



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

가중치를 이용한 국내 석회동굴

발달 방향성 해석법 개발

(Weighted analysis method for orientation of limestone
caves in Korea)

2014년 2월

서울대학교 대학원

지구환경시스템공학부

이 상 균

가중치를 이용한 국내 석회동굴 발달 방향성 해석법 개발

지도교수 박 형 동

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2014년 2월

서울대학교 대학원

지구환경시스템공학부

이 상 군

이상군의 공학박사 학위논문을 인준함.

2013년 12월

위 원 장 송 재 준 (인)

부 위 원 장 박 형 동 (인)

위 원 최 시 영 (인)

위 원 유 명 환 (인)

위 원 제 현 국 (인)

초 록

우리나라의 석회암지대는 고생대 오르도비스기에 형성된 것으로 남한과 북한지역 중 일부 지역에 국한되어 분포하고 있다. 석회암지대에 발달한 석회동굴의 경우 중요한 지질학적 연구 자료로의 활용될 뿐만 아니라 일반인에게 자연학습과 관광 등의 목적으로 이용되고 있다.

이렇게 석회동굴의 학술적 측면과 주변의 안정성 판단이 중요한 석회동굴의 해석에 있어서 보다 다양한 해석기법을 적용하여 석회동굴 주변 자료의 활용가치를 극대화 하고자 하였다.

본 연구를 통해 석회동굴 주변의 불연속면 및 방향성 자료를 바탕으로 석회동굴의 발달 방향성의 상태를 보다 정확하게 파악하여 주변 석회암지대의 안전성과 지반의 상태를 분석하고자 하였다.

석회동굴의 발달 방향성을 파악하기 위해 단순 방향성 분포해석 외에 연장성을 이용해 가중치를 적용하여 해석하였다. 이 기법을 적용하기 위해 새로운 10개의 항목 기준을 바탕으로 동굴도의 방향성과 폭을 추출하였다. 또한, 연장성을 통해 가중치가 설정된 방식은 2가지 방식이며, 동굴 내 방향성의 폭을 모두 추출한 후 전체 폭의 평균을 기준으로 판단하는 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 각 방향성의 폭에 대한 연장의 비율을 기준으로 판단하는 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)이다. 분석 결과 기존의 방향성 분포만을 해석한 것보다 두 가지 방식을 적용한 해석기법이 동굴 발달 방향성을 더욱 명확하게 표현하고 있음을 알 수 있었다.

국내 석회동굴 10개소의 광역선구조 분석과 석회동굴 주변의 불연속면 자료 등을 이용하여 석회동굴의 발달 방향성이 어떤 구조지질학적 요인과 주로 연계되어 있는지를 분석하여 그 연관성을 판단하였다.

석회동굴의 폭의 발달 형태를 해석하고자 각 동굴의 평균 폭과 동굴에 분포하는 방향성의 폭에 대한 연장성을 고려한 개별 발달 비율 (Individual Development Ratio)을 비교 분석하여 폭과 연장성의 상호 연관성을 판단하였다.

또한, 석회동굴의 평균 폭과 주변 주 층리의 경사각의 연관성 분석을 통해 경사각의 동굴 폭 형성의 상호 연관성을 해석하였다. 이를 통해 저각의 주 층리면이 동굴의 폭 확장에 영향을 미칠 수 있는 것으로 해석되는 정성적인 판단을 상관계수를 적용하여 해석하고자 하였다.

석회동굴 주변에서 취득한 현장 자료는 암반의 상태를 파악하는 매우 귀중한 자료이다. 이를 바탕으로 RMR 암반분류를 해석하였으며, 분석된 RMR 자료가 해당 석회동굴의 지역적 특성을 보일 수 있지만, 석회동굴의 지반상태를 파악에 유용할 것으로 판단되어 활용하고자 하였다.

동굴의 발달 방향성과 기반암의 암종, 동굴 발달의 주된 영향을 주는 방향성 인자, RMR을 통한 암반분류 등을 종합적으로 해석을 통해 암반의 안정성 여부와 방향성 자료의 상호 연관성을 분석하였다.

석회동굴의 발달을 판단함에 있어서 불연속면이나 단층과 같은 방향성 인자의 영향 뿐만아니라 지하수위 변화에 따른 영향성도 매우 중요한 판단요소이다. 또한 지하수위의 급변이 많은 지역은 싱크홀의 발생에 영향을 많이 미치고 지반 안정성의 위해요인으로 해석되기에 지하수위 급변과 RMR 암반분류를 통한 지반 안정성의 상호 연관성을 판단해 보았다.

끝으로, 석회동굴이 위치한 지역의 카르스트 지형의 지질공학적 분류를 통해 석회암지대의 용식 및 상태를 해석하고자 하였다.

이러한 연구 결과는 석회암 지대의 지질공학적 활용을 위해 초기 접근 시 필요한 안정성 판단에 큰 도움이 될 것으로 판단되며, 석회동굴의 발달 양상과 발달에 영향을 주는 인자들을 상호 비교함으로써 연관성을 해

석할 수 있다.

또한, 석회동굴의 연장성을 고려한 해석을 통해 연장성이 우수한 동굴의 경우 지속적 발달 가능성과 이후 발달 가능한 방향을 추정하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

주요어 : 석회동굴, 방향성, 광역선구조, 불연속면, 단층, RMR

학 번 : 99411-808

목 차

1. 서 론	1
1.1. 연구의 시작	1
1.2. 새로운 해석의 필요성	4
2. 지질공학적 분석을 위한 세부 항목	6
2.1. 석회암의 용식	6
2.2. 불연속면의 특징	13
2.2.1. 방향성(orientation)	13
2.2.2. 간격(spacing)	14
2.2.3. 연속성(persistence)	14
2.2.4. 거칠기(roughness)	15
2.2.5. 벽면강도(wall strength)	15
2.2.6. 틈(aperture)	17
2.2.7. 충전물(filling), 누수(seepage)	17
2.2.8. 불연속면군 수(number of sets)	18
2.2.9. 암괴규모(block size)	18
2.3. 광역 선구조	21
2.4. 동굴 발달 방향성 해석	23
2.4.1. 석회동굴 내 방향성 추출 기준	23
2.4.2. 석회동굴 내 방향성 해석	24

2.5. RMR(Rock Mass Rating)	28
----------------------------------	----

3. 국내 석회동굴 31

3.1. 고수동굴	31
3.1.1. 현장 개요	31
3.1.2. 광역 선구조	32
3.1.3. 지질특성	34
3.1.4. 동굴특성	36
3.1.5. 불연속면 특성 분석	42
3.2. 고씨동굴	52
3.2.1. 현장 개요	52
3.2.2. 광역 선구조	53
3.2.3. 지질특성	54
3.2.4. 동굴특성	57
3.2.5. 불연속면 특성 분석	64
3.3. 노동동굴	69
3.3.1. 현장 개요	69
3.3.2. 광역 선구조	70
3.3.3. 지질특성	71
3.3.4. 동굴특성	74
3.3.5. 불연속면 특성 분석	79
3.4. 백룡동굴	85
3.4.1. 현장 개요	85

3.4.2. 광역 선구조	86
3.4.3. 지질특성	87
3.4.4. 동굴특성	90
3.4.5. 불연속면 특성 분석	96
3.5. 성류동굴	99
3.5.1. 현장 개요	99
3.5.2. 광역 선구조	100
3.5.3. 지질특성	101
3.5.4. 동굴특성	104
3.5.5. 불연속면 특성 분석	110
3.6. 온달동굴	116
3.6.1. 현장 개요	116
3.6.2. 광역 선구조	117
3.6.3. 지질특성	118
3.6.4. 동굴특성	121
3.6.5. 불연속면 특성 분석	127
3.7. 용연동굴	132
3.7.1. 현장 개요	132
3.7.2. 광역 선구조	133
3.7.3. 지질특성	135
3.7.4. 동굴특성	137
3.7.5. 불연속면 특성 분석	142
3.8. 천곡동굴	145

3.8.1. 현장 개요	145
3.8.2. 광역 선구조	146
3.8.3. 지질특성	147
3.8.4. 동굴특성	150
3.8.5. 불연속면 특성 분석	156
3.9. 화암동굴	159
3.9.1. 현장 개요	159
3.9.2. 광역 선구조	160
3.9.3. 지질특성	161
3.9.4. 동굴특성	164
3.9.5. 불연속면 특성 분석	165
3.10. 환선동굴	171
3.10.1. 현장 개요	171
3.10.2. 광역 선구조	172
3.10.3. 지질특성	174
3.10.4. 동굴특성	176
3.10.5. 불연속면 특성 분석	182
4. 석회동굴 주변 방향성과 지질공학적 특성 분석	185
4.1. 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석	186
4.2. 방향성자료와 석회동굴 형성관계 해석	193
4.3. 석회동굴의 발달 양상	200
4.3.1. 연장성과 폭	200

4.3.2. 층리와 폭	203
4.4. RMR을 통한 지질공학적 해석 접근	206
4.4.1. RMR 특성	206
4.4.2. RMR과 동굴 방향성 특징	208
4.5. 지질공학적 분류로의 접근	210
4.5.1. 각 요인별 특징	210
4.5.2. 카르스트 지형의 분류	214
5. 결 론	216
참고문헌	219
Abstract	227

List of Tables

Table 1.2.1. Limestone caves for engineering geological study.	5
Table 2.1.1. An engineering classification of karst(Waltham & Fookes, 2012).	12
Table 2.2.1. Presentation of results for spacing(ISRM, 1978).	14
Table 2.2.2. Presentation of results for persistence(ISRM, 1978).	15
Table 2.2.3. Presentation of results for aperture(ISRM, 1978).	18
Table 2.2.4. Presentation of results for number of sets(ISRM, 1978). ..	19
Table 2.4.1. Classification parameter and their rating in RMR(Bieniawski, 1989).	29
Table 2.4.2. Rating adjustment for discontinuity orientations in RMR(Bieniawski, 1989).	30
Table 2.4.3. Rock mass classes determined from total ratings(Bieniawski, 1989).	30
Table 3.1.1. Weighting for persistence in Gosu Cave.	39
Table 3.1.2. Discontinuities of Left lateral of Gosu Cave Entrance. ..	46
Table 3.1.3. Discontinuities of Right lateral of Gosu Cave Entrance. ..	47
Table 3.1.4. Discontinuities of Left lateral of Gosu Cave Exit.	49
Table 3.1.5. Discontinuities of Right lateral of Gosu Cave Exit.	51
Table 3.2.1. Weighting for persistence in Gossigul Cave.	60
Table 3.2.2. Discontinuities of Upper slope of Gossigul Cave Entrance.	67
Table 3.2.3. Discontinuities of Right slope of Gossigul Cave Entrance.	68

Table 3.3.1. Weighting for persistence in Nodong Cave.	76
Table 3.3.2. Discontinuities of Left slope of Nodong Cave Entrance.	81
Table 3.3.3. Discontinuities of Right slope of Nodong Cave Entrance.	84
Table 3.4.1. Weighting for persistence in Baengnyong Cave.	91
Table 3.4.2. Discontinuities of Right slope of Baengnyong Cave Entrance.	98
Table 3.5.1. Weighting for persistence in Seongnyugul Cave.	107
Table 3.5.2. Discontinuities of Left lateral of Seongnyugul Cave Entrance.	114
Table 3.5.3. Discontinuities of Right lateral of Seongnyugul Cave Entrance.	115
Table 3.6.1. Weighting for persistence in Ondal Cave.	122
Table 3.6.2. Discontinuities of Left lateral of Ondal Cave Entrance.	130
Table 3.6.3. Discontinuities of Right lateral of Ondal Cave Entrance.	131
Table 3.7.1. Weighting for persistence in Yongyeon Cave.	139
Table 3.7.2. Discontinuities of Right lateral of Yongyeon Cave Entrance.	144
Table 3.8.1. Weighting for persistence in Cheongok Cave.	153
Table 3.8.2. Discontinuities of Upper slope of Cheongok Cave Entrance.	158
Table 3.9.1. Discontinuities of slope around Hwaam Cave Entrance.	168
Table 3.9.2. Discontinuities of Left lateral of Hwaam Cave Exit.	169
Table 3.10.1. Weighting for persistence in Hwanseongul Cave.	179

Table 3.10.2. Discontinuities of Left lateral of Hwanseongul Cave Entrance.	184
Table 4.1.1. Comparison between analysis using only number of orientations and analysis using weighting for persistence of orientations in each limestone cave.	187
Table 4.2.1. Orientations of limestone caves in South Korea.	194
Table 4.2.2. Expected influential factors for development of each limestone cave.	199
Table 4.3.1. Average span and Individual development feature.	202
Table 4.4.1. Rock Mass Rating(RMR) of 10 limestone caves in South Korea.	207
Table 4.5.1. Karst classification for area around limestone caves in South Korea.	215

List of Figures

Fig. 1.1.1. Limestone areas and locations of caves for this study in South Korea(based on KIGAM[2001]).	2
Fig. 2.1.1. Plan views of contrasting types of cave passage networks	9
Fig. 2.1.2. Idealized schematic diagram for cave development with changing ground water levels(based on Fookes & Hawkins[1988] after Palmer[1981]).	9
Fig. 2.1.3. Typical morphological features of karstic ground conditions within the five classes of the engineering classification of karst(Waltham & Fookes, 2012).	11
Fig. 2.2.1. Roughness of discontinuity.	16
Fig. 3.1.1. Location map of Gosu Cave(based on Website map.naver.com).	32
Fig. 3.1.2. Lineaments around Gosu Cave.	33
Fig. 3.1.3. Orientation analysis of lineaments around Gosu Cave.	33
Fig. 3.1.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Gosu Cave.	34
Fig. 3.1.5. Geologic map of Gosu Cave(by Korea Geological Survey[1967]).	35
Fig. 3.1.6. Orientation in Gosu Cave(based on Hong[2008]).	38
Fig. 3.1.7. Orientation analysis in Gosu Cave.	39
Fig. 3.1.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Gosu Cave.	40
Fig. 3.1.9. Orientation analysis using weighting for persistence with	

Individual Development Ratio Method(IDRM) in Gosu Cave. ···	41
Fig. 3.1.10. Gosu Cave Entrance.	43
Fig. 3.1.11. Gosu Cave Exit.	44
Fig. 3.2.1. Location map of Gossigul Cave(based on Website map.naver.com).	52
Fig. 3.2.2. Lineaments around Gossigul Cave.	53
Fig. 3.2.3. Orientation analysis of lineaments around Gossigul Cave.	54
Fig. 3.2.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Gossigul Cave.	55
Fig. 3.2.5. Geologic map of Gossigul Cave(by Korea Geological Survey[1966]).	56
Fig. 3.2.6. Orientation in Gossigul Cave(based on Kim[2011])	59
Fig. 3.2.7. Orientation analysis in Gossigul Cave.	60
Fig. 3.2.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Gosssigul Cave.	62
Fig. 3.2.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Gossigul Cave.	63
Fig. 3.2.10. Gossigul Cave Entrance.	64
Fig. 3.3.1. Location map of Nodong Cave(based on Website map.naver.com).	69
Fig. 3.3.2. Lineaments around Nodong Cave.	70
Fig. 3.3.3. Orientation analysis of lineaments around Nodong Cave. ·	71
Fig. 3.3.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Nodong Cave.	72

Fig. 3.3.5. Geologic map of Nodong Cave(by Korea Geological Survey[1967]).	73
Fig. 3.3.6. Orientation in Nodong Cave(based on Woo et. al.[2008]).	75
Fig. 3.3.7. Orientation analysis in Nodong Cave.	75
Fig. 3.3.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Nodong Cave.	77
Fig. 3.3.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Nodong Cave.	78
Fig. 3.3.10. Nodong Cave Entrance.	80
Fig. 3.4.1. Location map of Baengnyong Cave(based on Website map.naver.com).	85
Fig. 3.4.2. Lineaments around Baengnyong Cave.	86
Fig. 3.4.3. Orientation analysis of lineaments around Baengnyong Cave.	87
Fig. 3.4.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Baengnyong Cave.	88
Fig. 3.4.5. Geologic map of Baengnyong Cave(by Korea Geological Survey[1966]).	89
Fig. 3.4.6. Orientation in Baengnyong Cave(based on Kim[2011]).	92
Fig. 3.4.7. Orientation analysis in Baengnyong Cave.	93
Fig. 3.4.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Baengnyong Cave.	94
Fig. 3.4.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Baengnyong Cave.	95

Fig. 3.4.10. Right slope of Baengnyong Cave Entrance.	96
Fig. 3.5.1. Location map of Seongnyugul Cave(based on Website map.naver.com).	99
Fig. 3.5.2. Lineaments around Seongnyugul Cave.	100
Fig. 3.5.3. Orientation analysis of lineaments around Seongnyugul Cave.	101
Fig. 3.5.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Seongnyugul Cave.	102
Fig. 3.5.5. Geologic map of Seongnyugul Cave(by Korea Geological Survey[1963]).	103
Fig. 3.5.6. Orientation in Seongnyugul Cave(based on Kim[2011]). ..	106
Fig. 3.5.7. Orientation analysis in Seongnyugul Cave.	106
Fig. 3.5.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Seongnyugul Cave. ...	108
Fig. 3.5.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Seongnyugul Cave.	109
Fig. 3.5.10. Seongnyugul Cave Entrance.	111
Fig. 3.6.1. Location map of Ondal Cave(based on Website map.naver.com).	116
Fig. 3.6.2. Lineaments around Ondal Cave.	117
Fig. 3.6.3. Orientation analysis of lineaments around Ondal Cave. ...	118
Fig. 3.6.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Ondal Cave.	119
Fig. 3.6.5. Geologic map of Ondal Cave(by Korea Geological	

Survey[1967])).	120
Fig. 3.6.6. Orientation in Ondal Cave(based on Kim[2011])).	123
Fig. 3.6.7. Orientation analysis in Ondal Cave.	124
Fig. 3.6.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Ondal Cave.	125
Fig. 3.6.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Ondal Cave.	126
Fig. 3.6.10. Ondal Cave Entrance.	127
Fig. 3.7.1. Location map of Yongyeon Cave(based on Website map.naver.com).	132
Fig. 3.7.2. Lineaments around Yongyeon Cave.	133
Fig. 3.7.3. Orientation analysis of lineaments around Yongyeon Cave.	134
Fig. 3.7.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Yongyeon Cave.	135
Fig. 3.7.5. Geologic map of Yongyeon Cave(by Korea Geological Survey[1962])).	136
Fig. 3.7.6. Orientation in Yongyeon Cave(based on Kim[2011])).	138
Fig. 3.7.7. Orientation analysis in Yongyeon Cave.	138
Fig. 3.7.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Yongyeon Cave.	140
Fig. 3.7.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Developing Ratio Method(IDRM) in Yongyeon Cave.	141
Fig. 3.7.10 Right lateral of Yongyeon Cave Entrance.	142

Fig. 3.8.1. Location map of Cheongok Cave(based on Website map.naver.com).	145
Fig. 3.8.2. Lineaments around Cheongok Cave.	146
Fig. 3.8.3. Orientation analysis of lineaments around Cheongok Cave.	147
Fig. 3.8.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Cheongok Cave.	148
Fig. 3.8.5. Geologic map of Cheongok Cave(by Korea Geological Survey[1962]).	149
Fig. 3.8.6. Orientation in Cheongok Cave(based on Hong[1991]).	152
Fig. 3.8.7. Orientation analysis of in Cheongok Cave.	152
Fig. 3.8.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Cheongok Cave.	154
Fig. 3.8.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Cheongok Cave.	155
Fig. 3.8.10. Upper slope of Cheongok Cave Entrance.	156
Fig. 3.9.1. Location map of Hwaam Cave(based on Website map.naver.com).	159
Fig. 3.9.2. Lineaments around Hwaam Cave.	160
Fig. 3.9.3. Orientation analysis of lineaments around Hwaam Cave.	161
Fig. 3.9.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Hwaam Cave.	162
Fig. 3.9.5. Geologic map of Hwaam Cave(by Korea Geological Survey[1962]).	163

Fig. 3.9.6. Hwaam Cave map(based on Jeong et. al.[2005]).	165
Fig. 3.9.7. Slope around Hwaam Cave Entrance.	166
Fig. 3.9.8. Left lateral of Hwaam Cave Exit.	166
Fig. 3.10.1. Location map of Hwanseongul Cave(based on Website map.naver.com).	171
Fig. 3.10.2. Lineaments around Hwanseongul Cave.	173
Fig. 3.10.3. Orientation analysis of lineaments around Hwanseongul Cave.	173
Fig. 3.10.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Hwanseongul Cave.	174
Fig. 3.10.5. Geologic map of Hwanseongul Cave(by Korea Geological Survey[1962]).	175
Fig. 3.10.6. Orientation in Hwanseongul Cave(based on Kim[2011]).	178
Fig. 3.10.7. Orientation analysis in Hwanseongul Cave.	179
Fig. 3.10.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Hwanseongul Cave.	180
Fig. 3.10.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Hwanseongul Cave.	181
Fig. 3.10.10. Left lateral of Hwanseongul Cave Entrance.	182
Fig. 4.3.1. Dip angle and Average span.	205
Fig. 4.5.1. Guinemi village around Hwanseongul Cave.	211
Fig. 4.5.2. Rockhead in Guinemi village around Hwanseongul Cave.	212

1. 서 론

1.1. 연구의 시작

우리나라는 북한의 평안도 일대와 남한의 강원도 정선, 영월, 태백, 삼척, 충청북도 제천 및 단양, 전라북도 화순, 경상북도 문경 및 울진 일대에 고생대 오르도비스기에 주로 형성된 석회암지대가 분포하고 있다 (Fig. 1.1.1).

국내 석회암은 노천 채굴을 통해 우리나라의 산업화 발전에 기여해 왔으며 환경 및 자연생태계 보전을 위해 점차 갱내화 및 심부화 되고 있다. 이러한 변화는 환경과 안전의 중요성이 두각되며 나타나는 현상으로, 환경적 관심의 증대는 일반인들에게도 확산되고 있다.

점차 웰빙(well-being)과 여가 활동의 급증으로 자연을 접하고 자연의 신비함 속에서 휴식을 즐기고자 한다. 자연의 신비함을 자연 그대로 느끼고자 용암동굴이나 석회동굴과 같은 개방동굴로의 탐방이 활성화되어지고 있다. 더욱이, 자연 석회동굴의 경우 오랜 시간에 걸쳐 형성되는 종유석, 석주, 석순 등과 같은 다양한 2차 생성물은 그 신비함을 배가시킨다. 따라서, 석회동굴의 관광화를 위한 체계적인 시도가 지자체별로 시행되고 있고 있으며, 천연 관광자원의 관리의 중요성이 대두되고 있다(홍현철, 2008; 권동희, 2011).

국내 알려진 석회동굴은 1,500여개 이상인 것으로 알려지고 있지만, 실제 분포하는 개소는 그보다 훨씬 더 많을 것으로 판단하고 있다.

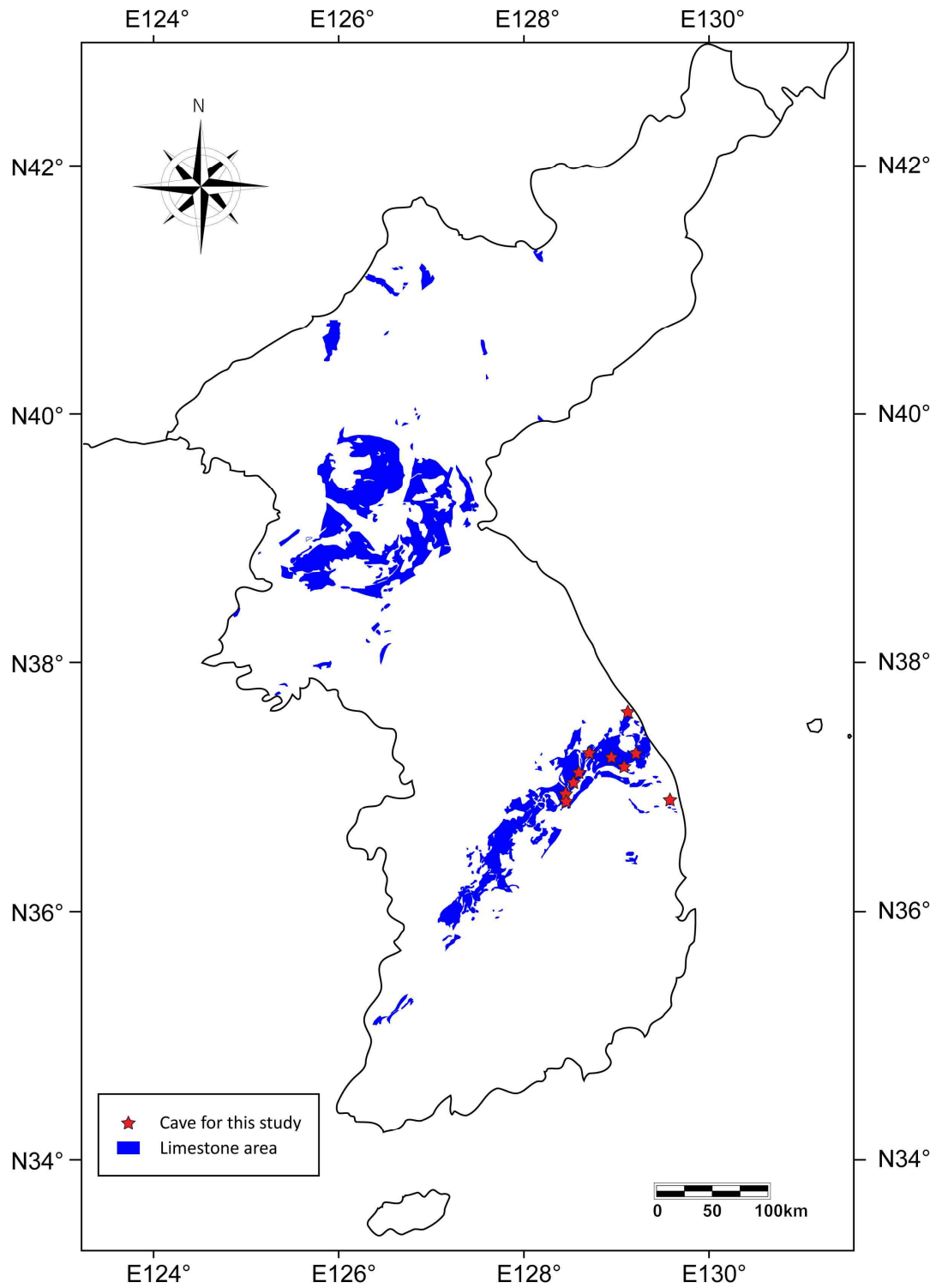


Fig. 1.1.1. Limestone areas and locations of caves for this study in Korea(based on KIGAM[2001]).

이렇게 수많은 석회동굴은 자연 그대로의 형태를 제공하기 때문에 청소년들과 일반인들에게 매우 유익한 자연 생태 학습장으로 활용되고 있다.

그러나, 석회동굴의 공개는 주변 싱크홀 발생의 위험이나 석회동굴 내 낙반의 위험성 등 관람에 있어 위험성이 그대로 내포되어 있는 문제점들이 잔존하고 있다.

또한, 석회동굴 그 자체는 학술적 가치를 다양하게 내포하는 문화유산인데, 무분별하게 일반인에게 개방되어 흑색오염 및 녹색오염 등이 발생하게 되면 그 가치는 사라지게 된다(경만호 외, 1993; 홍현철, 2008; 김련, 2011).

이렇게 일반인에게 자연의 신비함을 통한 자연 생태의 체험 및 학습의 장을 줄 수도 있지만, 잘 준비되거나 관리되지 않으면 싱크홀이나 지반 침하, 낙석, 동굴 내 오염과 훼손 등으로 학술적 가치가 매우 풍부한 자연 유산이 파괴되는 문제가 나타날 수 있다.

석회동굴이 포함되는 카르스트 지형에서의 개발은 초기에 지질조사를 수행하는 연구진들을 힘들게 한다. 외부로 잘 노출되어있지 않은 잠재적 위험인 싱크홀과 공동(cavity)은 초기에 발견되면 대처가 용이하지만 개발 중 확인될 경우 경제적, 시간적 손해를 초래하게 한다. 위험성에 대한 부적절한 대응으로 개발을 강행할 경우 안전성에 지대한 악영향을 미칠 수 있다. 그래서, 초기 조사시 최대한 정확하고 정밀한 조사로 접근하여야 한다.

1.2. 새로운 해석의 필요성

자연의 신비를 즐기고자 하는 석회동굴 관람객의 안전을 확보하고 카르스트 지형에 잔존하는 자연재해 발생 위험의 가능성을 정확하게 판단하기 위해서는 초기 조사가 매우 중요하다.

석회동굴의 초기 조사시 많은 장비와 인력이 투입되어 조사를 하면 좋지만, 시간적·경제적 문제와 더불어 진입이 용이하지 않고 학술적 가치의 보호가 있어야 하는 경우 많은 제약이 따른다. 조사자는 최소한의 장비만을 이용하여 현장상황을 파악하고 조사된 자료를 바탕으로 최대한의 유용한 해석을 찾는 것이 중요하다. 현재 국내에서 조사되는 석회동굴의 경우 최소한의 장비를 이용하여 조사를 수행하고 있으며, 그 활용성이 지질공학적 해석의 관점에서 보면 다소 떨어지고 있다.

석회동굴 형성의 원인 및 동굴의 연장 상태, 지질공학적 관점에서의 암반상태 해석과 같은 다양한 해석은 석회동굴의 발달 양상을 해석함에 있어 매우 유용하다. 또한, 석회동굴 주변의 안전성 확보와 개발 가능성 확인 등에 활용될 수 있을 것으로 본다.

지질공학적인 새로운 해석의 적용을 위해 Table 1.2.1에 기술한 국내 석회동굴 10개소를 조사하였다. 본 연구에 적용되는 석회동굴은 국내 개방형 석회동굴 중 조사가 가능한 지역으로 임의 선정하였다.

국내 석회동굴을 기초로 한 본 연구에서는 동굴의 발달 방향성의 선정, 동굴 형성의 주된 원인이 되는 구조지질학적 요소의 판별, RMR 암반분류법을 통한 지질공학적 해석 접근, 카르스트 지형의 분류 등과 같은 해석법을 통해 석회동굴 주변의 특성을 파악하고자 한다.

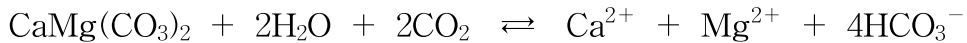
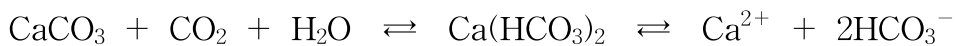
Table 1.2.1. Limestone caves for this study.

Cave	Classification	Region	Ownership	Entrance Opening
Gosu	Natural Monument 256	Danyang-gun Chungcheongbuk-do	National, Public, Private Property	Open
Gossigul	Natural Monument 219	Yeongwol-gun Gangwon-do	National Property	Open
Nodong	Natural Monument 262	Danyang-gun Chungcheongbuk-do	National, Private Property	Closed
Baengnyong	Natural Monument 260	Pyeongchang-gun Gangwon-do	National Property	Open
Seongnyugul	Natural Monument 155	Uljin-gun Gyeongsangbuk-do	Uljin-gun	Open
Ondal	Natural Monument 261	Danyang-gun Chungcheongbuk-do	National, Public Property	Open
Yongyeon	City/Province Monument 39	Taebaek-si Gangwon-do	National Property	Open
Cheongok	Not-registered	Donghae-si Gangwon-do	Public Property	Open
Hwaam	City/Province Monument 33	Jeongseon-gun Gangwon-do	Private Property	Open
Hwanseongul (a part of Daeiri Caves)	Natural Monument 178	Samcheok-si Gangwon-do	National, Private Property	Open

2. 지질공학적 분석을 위한 세부 항목

2.1. 석회암의 용식

석회동굴의 형성은 동굴이 형성된 지역의 암질의 영향에 의한 것이다. 방해석(CaCO_3)을 주 구성광물로 한 석회암(limestone)이나 석회암의 재결정작용(recrystallization)에 의해 생성된 고회암(dolomite)이 분포하는 지역에서 형성된다. 해당 암층이 분포하는 지역에서 지표수 및 지하수 내에 이산화탄소가 용존된 상태로 지반내로 유입되면서 미세 균열을 따라 용식작용이 시작된다.



용식작용의 진행은 석회암의 주성분인 CaCO_3 의 함유 정도에 따라 용식의 진행 속도에 차이를 보이게 된다. 석회암이나 고회암이 분포는 경우 석회암의 CaCO_3 의 함유율이 높을수록 용식의 진행이 용이하며 이후 탄산의 산도와 환경적 요인에 따라 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 가 서서히 용식된다.

용식작용은 가역반응으로 지하수내 용해된 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 등이 다시 결합하여 고형화하게 되는데 이것이 석회동굴 내 2차생성물로 불리는 물질들이다. 석회동굴 내 2차생성물로는 종유석, 석순, 석주, 종유커튼 등이 있는데 자연의 아름다운 조형물로 거듭난다.

지표에서는 용식의 진행에 있어 먼저 용식된 부분과 용식이 안되는 이 물질이 있거나 CaCO_3 의 함량의 차이로 용식이 느리게 진행되는 부분으

로 나뉘는데, 이러한 차이로 지반 내에는 pinnacle rockhead를 형성하여 빈 곳에 석회암의 풍화잔류물인 테라로사(terra rossa)로 채워지게 된다.

석회암의 용식은 100년에 수 mm도 안 되는 매우 느린 진행을 보이며, 용식이 진행되는 석회암의 강도는 통상 30~100MPa의 범위를 보인다(Dreybrodt *et al.*, 2002; Waltham and Fookes, 2012). 이러한 특성을 보이는 석회암의 용식 확장은 절리면, 층리면, 단층면 등을 따라 진행되지만 처음에 어떠한 원인에서 시작되었는지를 명확히 판단하는 것은 매우 어려운 일이며 그 연장성을 정확히 파악하는 것도 어렵다(Fig. 2.1.1). 석회공동 내지 석회동굴이 외부로 노출되지 않는 한 그 진행방향을 명확히 알 수 없으며, 노출되지 않은 석회용식은 싱크홀(sink hole)이나 지반침하와 같은 잠재적 위험성을 내포하게 된다(Culshaw and Waltham, 1987; Randall *et al.*, 1999).

Fookes and Hawkins(1988)는 석회공동의 확장은 지하수의 변화에 밀접한 관계가 있음을 제시하고 있다. 기후 변화와 지질학적 변화와 맞물려 지하수위가 낮아짐에 따라 공동에 공기의 접촉이 있게 되고 공동이 확장되며 점차 동굴의 형태를 갖추게 된다. 공동은 점차 석회동굴의 형태를 띠게 되며 단일층을 형성하기보다는 여러 층을 형성한다(Fig. 2.1.2). 또한, 지하수위 변화는 하강 후 상승을 반복하면서 공동의 확장과 석회동굴 내 2차생성물의 변화를 나타나게 된다(조경남 외, 2008).

석회공동의 확장으로 석회동굴이 형성되고 이를 통해 주변에는 돌리네와 우발레, 폴리에 등 다양한 카르스트 지형의 형태를 갖추게 된다. 이러한 카르스트 지형은 싱크홀이나 지반침하와 같은 잠재적 위험성을 내포

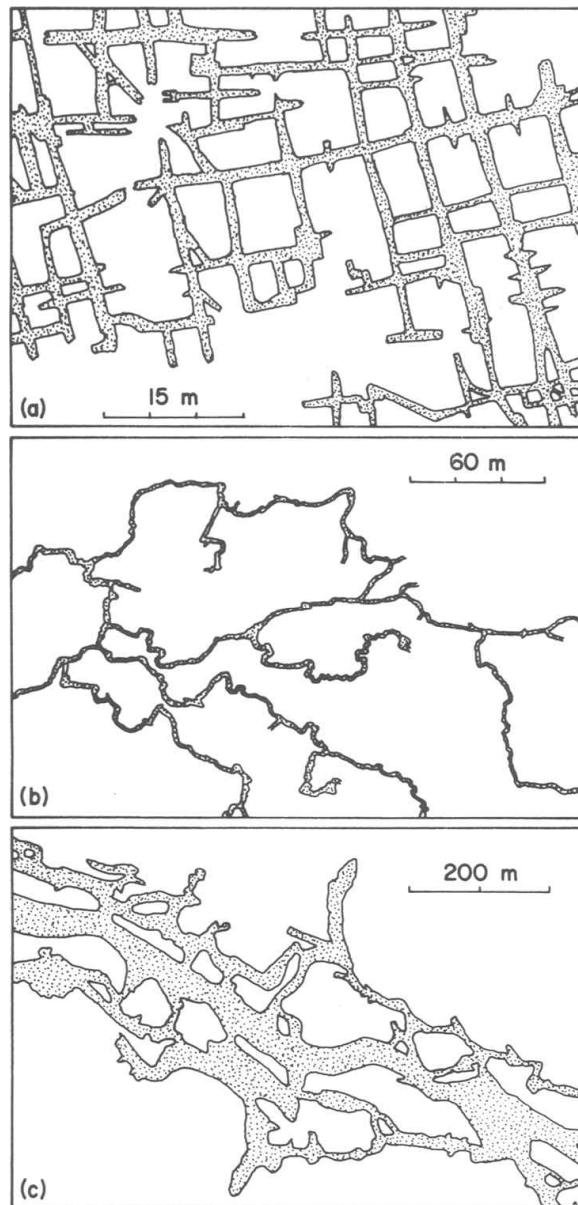


Fig. 2.1.1. Plan views of contrasting types of cave passage networks
(Culshaw and Waltham, 1987).

- (a) Limestone dissolution like maze related to joint in the English Pennines.
- (b) Stream lines related to bedding in an English Pennine cave.
- (c) Large cave complex in Sarawak; It's difficult to find positive pattern for orientation.

하므로 그 안정성을 판단함에 있어 신중을 기하게 된다.

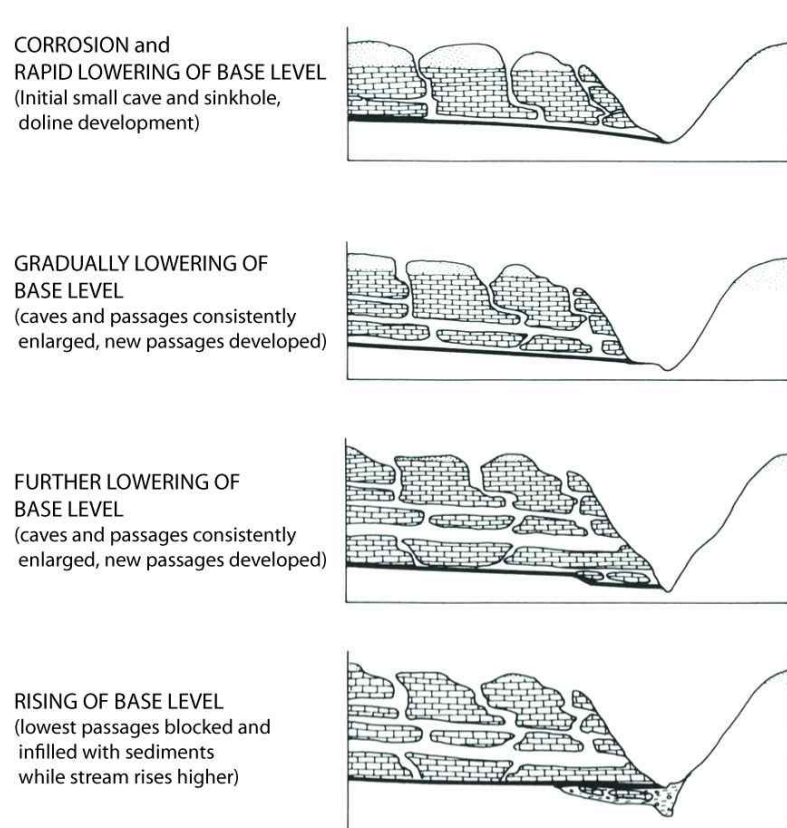


Fig. 2.1.2. Idealized schematic diagram for cave development with changing ground water levels(based on Fookes & Hawkins[1988] after Palmer[1981]).

석회동굴은 규모나 형태, 상부 퇴적토양의 두께, 불연속면의 발달상태 등에 따라 각기 다르지만, 동굴 상부의 두께가 통상 10m이상의 신선한 석회암일 경우 붕괴하지 않는다. 30m를 넘는 경우 공학적으로 아무런 문제가 없다(Waltham, 1989). 또한, 대부분의 자연 석회동굴은 인위적으로 설치된 터널에 비해서도 안전하다. 지표 하부 깊은 심도에 위치한 석회동굴은 안전하다고 판단할 수 있으며 잠재적 위험성이 큰 것은 얕은

심도에 크기가 큰 동굴이다(Waltham & Fookes, 2012). 이는 석회공동의 크기와 심도의 상관성에 있어 공동 심도가 공동의 크기(폭)보다 안전성에 더 큰 영향을 미친다고 할 수 있다(천병식과 박형준, 2005).

석회동굴의 위험성을 판단함에 있어 개략적 판단 기준은 동굴의 암반 심도가 동굴 폭보다 클 때 안정성에 문제가 있다고 할 수 있다(Waltham & Fookes, 2012).

석회동굴(cave) 및 석회공동(cavity)의 함몰은 주로 싱크홀(sinkhole) 또는 돌리네(doline)의 형태로 나타나는데 이는 붕괴 전 상부에 있는 토사의 영향이 매우 크다(Jammal, 1986; Waltham and Fookes, 2012). 토사의 양과 함수상태에 따라 그 위험성은 각기 다르며, 폭우에 의한 상재하중의 증가, 인위적 활동에 의한 불완전한 배수가 큰 원인이 되기도 한다(Newton, 1987; Waltham, 1989; Goodman, 1993; Hyatt and Jacobs, 1996).

Fig. 2.1.3과 Table 2.1.1에서 보는 바와 같이 석회동굴을 포함하는 카르스트 지형은 지질공학적 관점에서 kI(Juvenile)~kV(Extreme)로 5단계로 분류할 수 있다. 위치적 요인(Location), 싱크홀(Sinkhole), Rockhead, 균열(Fissuring), 동굴(Cave), 지반상태(Ground investigation), 기초(Foundation) 등의 인자를 이용하여 지반상태를 해석하고 분류할 수 있다(Waltham & Fookes, 2012).

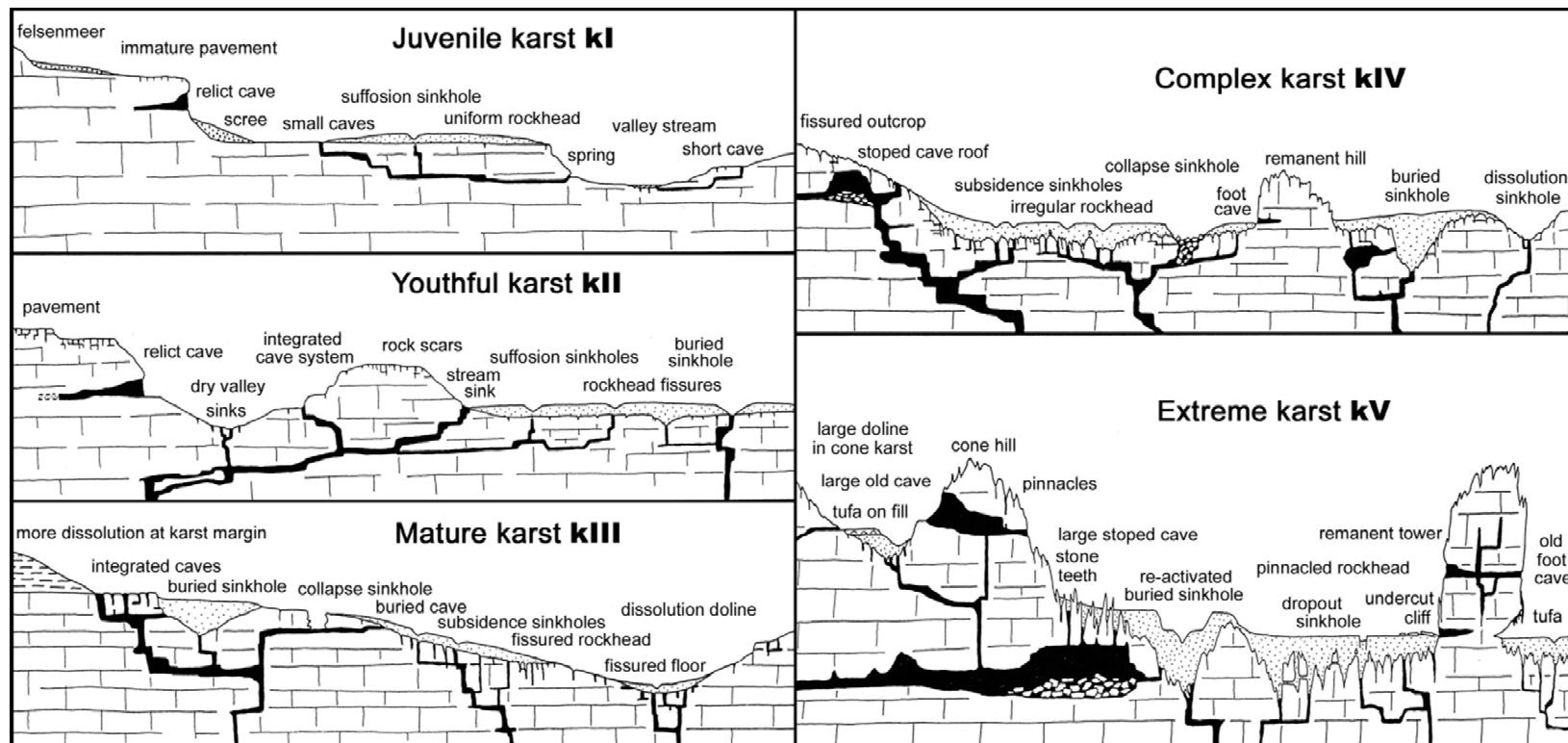


Fig. 2.1.3. Typical morphological features of karstic ground conditions within the five classes of the engineering classification of karst(Waltham & Fookes, 2012).

Table 2.1.1. An engineering classification of karst(Waltham & Fookes, 2012).

Karst class	Locations	Sinkholes	Rockhead	Fissuring	Caves	Ground investigation	Foundations
k I Juvenile	Only in deserts and periglacial zones, or on impure carbonates	Rare; NSH <0.001	Almost uniform; minor fissures	Minimal; low secondary permeability	Rare and small; some isolated relict features	Conventional	Conventional
k II Youthful	The minimum in temperate regions	Small suffusion or dropout sinkholes; open stream sinks; NSH 0.001 - 0.05	Many small fissures	Widespread in the few metres nearest surface	Many small caves; most <3 m across	Mainly conventional, probe rock to 3 m, check fissures in rockhead	Grout open fissures; control drainage
k III Mature	Common in temperate regions; the minimum in the wet tropics	Many suffusion and dropout sinkholes; large dissolution sinkholes; small collapse and buried sinkholes; NSH 0.05 - 1.0	Extensive fissuring; relief of <5 m; loose blocks in cover soil	Extensive secondary opening of most fissures	Many <5 m across at multiple levels	Probe to rockhead, probe rock to 4 m, microgravity survey	Rafts or ground beams, consider geogrids, driven piles to rockhead; control drainage
k IV Complex	Localized in temperate regions; normal in tropical regions	Many large dissolution sinkholes; numerous subsidence sinkholes; scattered collapse and buried sinkholes; NSH 0.5 - 2.0	Pinnacled; relief of 5 - 20 m; loose pillars	Extensive large dissolutional openings, on and away from major fissures	Many >5 m across at multiple levels	Probe to rockhead, Probe rock to 5 m with splayed probes, microgravity survey	Bored piles to rockhead, or cap grouting at rockhead; control drainage and abstraction
k V Extreme	Only in wet tropics	Very large sinkholes of all types; remanent arches; soil compaction in buried sinkholes; NSH $\gg 1$	Tall pinnacles; relief of >20 m; loose pillars undercut between deep soil fissures	Abundant and very complex dissolution cavities	Numerous complex 3-D cave systems, with galleries and chambers >15 m across	Make individual ground investigation for every pile site	Bear in soils with geogrid, load on proven pinnacles, or on deep bored piles; control all drainage and control abstraction

** Note : These parameter are important factors related to karst ground condition.*

It should be viewed in conjunction with Fig. 2.1.3, which shows some of the ideal morphological features.

NSH = rate of formation of new sinkholes per km² per year.

2.2. 불연속면의 특징

지반 내 지층은 시간이 흐름에 따라 주변 환경의 특징을 내포하게 된다. 지반 내 불연속면은 암반의 특성을 제시하는 명확한 인자로써 조사의 중요성이 항상 제시되는 항목이다. 따라서 지반의 특성을 판단하고자 할 때 불연속면의 특성을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다 (Fookes and Denness, 1969; Attewell and Farmer, 1976; Baecher and Lanney, 1978; ISRM, 1978; Priest and Hudson, 1981; Pinnaduwa *et al.*, 1990).

불연속면의 조사는 측정자의 주관적 판단에 의해 불연속면 특성의 착오가 발생할 수 있기에 측정의 오차를 최소화하기 위해 ISRM(1978)에서는 10개의 조사항목을 설정하고 판단기준을 제시하였다.

본 연구의 조사항목은 불연속면의 방향성(orientation), 간격(spacing), 연속성(persistence), 거칠기(roughness), 벽면강도(wall strength), 틈(aperture), 충전물(filling), 누수(seepage) 등을 현장조사를 통해 수행하였다. 현장자료를 바탕으로 불연속면의 방향성을 추출하기 위해 군수(number of sets)를 설정하고, RMR 분석 인자 중 RQD 수치 산출을 위해 암괴규모(block size)를 분석하였다.

본 연구에서도 ISRM(1978)의 기준을 바탕으로 조사하였으며 중요 항목별 특징을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

2.2.1. 방향성(orientation)

불연속면의 방향성은 클리노미터(clinometer)를 이용하여 측정하며 측

정면의 대표성을 갖는 면에 대해 수행한다. 조사된 방향성은 Dips와 같은 소프트웨어를 이용하여 투영하고, 그 방향성을 제시한다. Pole-diagram과 rose-diagram의 기법을 이용하여 표시하며 불연속면의 군집이 설정 가능하면 군집별로 우세한 방향성을 표시하여 대표 방향성으로 표현하게 된다.

2.2.2. 간격(spacing)

불연속면의 간격은 암반의 강도와 매우 밀접한 특성을 보이는 인자로써 간격이 좁으면 좁을수록 암반강도는 떨어지게 된다. 암반의 암괴 규모의 추정이 가능하며, 암반의 투수율이나 누수특성을 판단하는 인자가 되기도 한다.

간격의 분류는 Table 2.2.1과 같다.

Table 2.2.1. Presentation of results for spacing(ISRM, 1978).

Description	Spacing
Extremely close spacing	< 20 mm
Very close spacing	20 ~ 60 mm
Close spacing	60 ~ 200mm
Moderate spacing	200 ~ 600 mm
Wide spacing	600 ~ 2,000 mm
Very wide spacing	2,000 ~ 6,000 mm
Extremely wide spacing	> 6,000 mm

2.2.3. 연속성(persistence)

연속성 인자는 불연속면의 크기나 면적의 정도를 나타낸다. 조사 노두에서 나타나는 불연속면의 길이로 표시된다. 개략적으로 노출된 표면에

서의 불연속면의 길이를 측정함으로써 정량화 될 수 있다.

연속성의 판단은 Table 2.2.2과 같다.

Table 2.2.2. Presentation of results for persistence(ISRM, 1978).

Description	Persistence
Very low persistence	< 1 m
Low persistence	1 ~ 3 m
Medium persistence	3 ~ 10 m
High persistence	10 ~ 20 m
Very high persistence	> 20 m

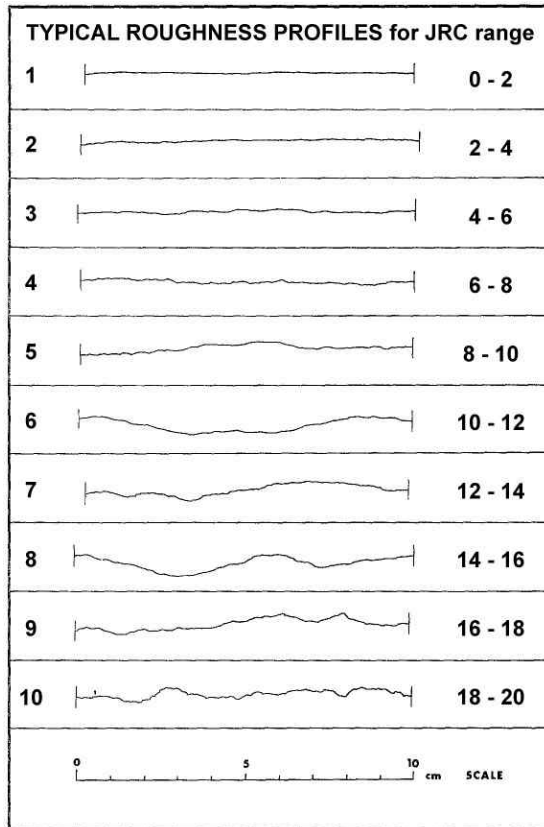
2.2.4. 거칠기(roughness)

불연속면의 불균질한 정도(unevenness)나 굴곡의 정도(waviness)를 표시한다. 거칠기의 조사는 현장에서 이루어진 선형 테이터를 조사자의 주관적 판단에 의해 기입하게 되기 때문에 거친 정도를 정확하게 표기하는 것은 매우 어려운 작업이다. Barton & Choubey(1977)에 의해 제시된 JRC를 바탕으로 그 판단기준을 ISRM(1978)에서 새로이 제시하고 있다 (Fig. 2.2.1).

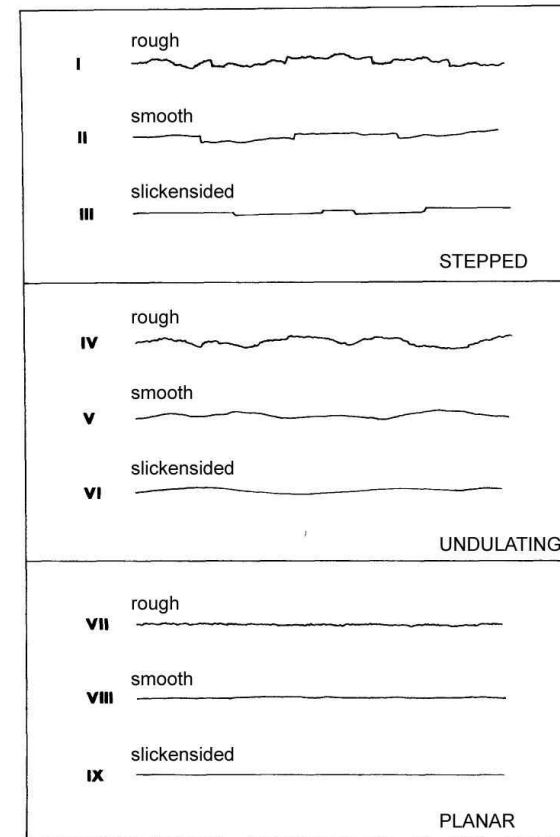
2.2.5. 벽면강도(wall strength)

조사면의 현지암반 강도를 측정하기 위하여 지오해머(geo-hammer)의 타격음을 이용하여 판단하거나 칼의 굽힘, 슈미트해머(Schmidt hammer)의 타격 등을 이용하게 된다.

현장의 암의 강도는 암석의 풍화정도에 따라 그 상태를 달리하기 때문에 정확한 측정이 매우 중요하다.



(a) Roughness profiles corresponding to the typical range of JRC values associated with each joint(Barton & Choubey, 1977).



(b) Typical roughness profiles and suggested nomenclature(ISRM, 1978).

Fig. 2.2.1. Roughness of discontinuity.

본 연구에서는 강도의 정량적 해석을 위해 슈미트해머를 이용하여 조사면의 강도를 측정하였으며, ISRM(1978)에서는 Miller(1965)의 슈미트해머 보정 차트를 이용하여 보정하도록 하고 있다. 암종 및 주변 환경에 따라 풍화의 진행이 각기 다르고 그에 따른 강도의 상태도 다르기 때문에 정확한 해석을 위해서는 유사 암종에 대한 연구자료를 활용하는 것이 필요하다. Kart *et al.*(2000)는 퇴적암 계열인 석회암과 사암에 대한 슈미트해머의 상관식을 도출하였는데 상관성이 매우 우수하여 본 연구에서 적용하였다.

$$Uniaxial\ strength(MPa) = 2.208e^{(0.067 \times R)}$$

R : Rebound number

2.2.6. 틈(aperture)

두 불연속면 사이에 존재하는 암석간의 분리된 공간으로 수직거리를 의미한다. 통상 빈 공간으로 존재하거나 충전물 등으로 채워진 상태다.

ISRM(1978)에서 제시하는 판단 기준은 Table 2.2.3과 같다.

2.2.7. 충전물(filling), 누수(seepage)

불연속면의 틈은 빈 공간을 이루거나 시간이 지남에 따라 점토, 실트, 모래, 부식물 등과 같은 매질로 채워지게 된다. 또한, 불연속면은 지표수 및 지하수의 흐름과 석회암의 용식에 영향을 줄 수 있기 때문에 누수상태를 잘 파악하는 것은 매우 중요하다.

Table 2.2.3. Presentation of results for aperture(ISRM, 1978).

Description		Aperture
"Closed" features	Very tight	< 0.1 mm
	Tight	0.1 ~ 0.25 mm
	Partly open	0.25 ~ 0.5 mm
"Gapped" features	Open	0.5 ~ 2.5 mm
	Moderately wide	2.5 ~ 10 mm
	Wide	> 10 mm
"Open" features	Very wide	1 ~ 10 cm
	Extremely wide	10 ~ 100 cm
	Cavernous	> 1 m

2.2.8. 불연속면군 수(number of sets)

불연속면의 분석을 통해 유사 방향성을 보이는 집단을 구획하여 군(set)을 설정하게 되며 이를 통해 대표 방향성을 설정할 수 있다. 암석의 경우 존재하는 불연속면의 군에 따라 파괴유형이 달라지기 때문에 정확한 분석이 필요하다.

ISRM(1978)에서 제시하는 판단 기준은 Table 2.2.4와 같다.

2.2.9. 암괴규모(block size)

암괴의 규모는 암반 거동을 판단하는 중요한 인자이며 지반의 붕괴와도 많은 연관성을 가지고 있다. 특히 지반 내 갱도의 붕괴는 갱도의 폭과 암괴규모와의 해석이 매우 중요하다. 암괴의 규모는 암괴크기지수(block size index, Ib)나 불연속면의 체적절리계수(volumetric joint count, Jv)로 표시할 수 있다.

Table 2.2.4. Presentation of results for number of sets(ISRM, 1978).

Degree	Description
I	massive, occasional random
II	one joint set
III	one joint set and random
IV	two joint set
V	two joint set and random
VI	three joint set
VII	three joint set and random
VIII	four or more joint set
IX	crushed rock, earth-like

본 연구에서 현장에서 선조사(scanline survey)를 수행한 후 방향성 파악을 위해 군집을 설정하였다. 각 군집의 측정 총거리와 빈도를 이용하는 체적절리계수를 이용하였다.

2.2.9.1. 암괴크기지수(Ib)

$$Ib = \frac{(S1 + S2 + S3 + \dots + Sn)}{n}$$

n : 불연속면 군집의 수

Sn : 각 불연속면 군집의 절리간격 평균

2.2.9.2. 체적절리계수(Jv)

$$Jv = \frac{\lambda1}{L1} + \frac{\lambda2}{L2} + \frac{\lambda3}{L3} + \dots + \frac{\lambda n}{Ln}$$

$$Jv = \frac{1}{S1} + \frac{1}{S2} + \frac{1}{S3} + \dots + \frac{1}{Sn}$$

λn : n번째 불연속면 군집의 빈도

Ln : n번째 불연속면 군집의 측정길이

현장조사자료를 RMR로 해석하기 위해서는 RQD 수치가 필요하다. 이를 보완하기 위해서 암반분류법에서 많이 사용되는 RQD와의 상관식을 이용하여 RQD 수치를 판단하였다.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (RQD = 100 \text{ for } J_v < 4.5)$$

2.3. 광역 선구조

조사지역에 대한 연구에 있어서 광역적인 지반상태를 확인하는 것은 매우 중요하다. 지질 패턴의 양상과 함께 지형 형성의 원인을 확인하게 되면 지반상태를 해석하는데 많은 도움을 받게 된다. 광역의 지반을 해석하는데 있어서 선구조 분석 기법은 매우 효과적이다.

선구조(lineament)는 직선의 선형적 지형요소로 지표면 및 천부의 지형요소의 구분이 명확한 단층대나 파쇄대 또는 차별침식에 의해 형성된 파쇄대를 의미하게 된다(Sabins, 1978; Masuoka *et. al.*, 1988; 김원균 외, 1996). 이러한 단층과 같은 대규모 지구조적 운동은 지형을 형성하는 중요한 요인이기에 선구조는 지구조적인 영향에 의해 형성된 것으로 판단할 수 있다. 또한, 해당 선구조를 추출함에 있어서 해상도를 결정하는 격자망의 간격을 적절하게 설정하여 해석하는 것은 매우 중요하다(박수진과 손일, 2005).

선구조는 선형적 방향성을 내포하지만 그 연장성도 매우 중요하다. 단순히 작은 선형들이 복잡하게 위치하고 하나의 선형이 우세하게 발달된 경우 전체 개수에 대한 방향성 해석과 함께 연장성(persistence)을 고려한 해석도 필요하다.

연장성을 고려함에 있어, 가중치의 설정과 구획 설정은 매우 중요하다. 전체 조사 구획의 크기와 영역을 어떻게 설정하느냐에 따라 그 해석은 달라질 수 있다(박수진과 손일, 2005).

1차적으로 나타난 선구조는 조사 구획에 따라 영향을 받을 수 있으므로 가중치 설정 기준을 조사 구획의 비율로 설정하였다. 또한 영역의 설정은 중심에서 동서남북 방향으로 동일한 거리를 둔 정방형의 공간 설정

이 타당하며 이를 기준으로 하여 해석한다.

본 연구에서는 동서방향 10km, 남북방향 10km 폭으로 설정하여 광역 선구조를 수행하였으며, 가중치의 설정은 기준 폭의 1/20(500m), 1/10(1km), 1/5(2km) 등을 기준으로 가중치를 두도록 하여 분석하였다.

가중치 설정 방식은 다음과 같이 설정하여 기준치 이상이 되는 선구조의 연장성에는 기준에 대해서는 가중치가 비율적으로 추가되도록 하였다.

If Lineament Length \leq Criteria,
set weighting value = Basic

But Lineament Length $>$ Criteria,
set weighting value = Basic $\times \frac{\text{Lineament Length}}{\text{Criteria}}$

가중치 적용에 있어서 설정 기준에 못 미치는 연장성을 보이는 선구조에 대한 해석이 문제될 수 있다. 기준에는 못 미치지만 지질 내 선구조를 포함하는 형태기 때문이다. 미세한 선구조가 다수 발달하고 가중치 설정 기준이 넓은 경우 가중치 영역에 많이 포함되지 않게 되고 단순히 우세한 선구조만 표현하게 되어 주변 광역의 선구조를 파악한다는 의미에서 보면 부적절할 수 있다. 따라서, 가중치 설정 기준을 포함할 경우와 제외될 경우에 대해서도 같이 판단하여 해석하도록 하였다.

이러한 연장성 해석은 기본 방향성만을 제시하는 방향성 해석과 연계하여 판단한다면 선구조의 해석이 더욱 정확해질 수 있다.

2.4. 동굴 발달 방향성 해석

석회동굴은 미세한 균열사이에서 용식이 발달하여 단층면, 습곡면, 절리면이나 층리면 같은 불연속면을 따라 그 형태를 확장해 나간다. 따라서 동굴의 형태를 이루는 동안 주변의 구조지질학적 요인이 큰 작용을 한다고 할 수 있다. 용식은 발달이 정확히 어느 지점에서 발달되었는지는 판단하기 어렵지만 석회동굴 형성에 단층이나 습곡과 같은 규모가 큰 구조지질학적 요인이 주로 작용하였는지 불연속면과 같이 상대적으로 작은 규모의 요인이 주로 작용하였는지는 추정할 수 있다. 이는 동굴의 발달 방향이 어느 요인의 방향성과 주로 일치하는지, 아니면 독자적인 형태를 이루어 발달하였는지를 판단하여 가능하게 된다.

2.4.1. 석회동굴 내 방향성 추출 기준

석회동굴도는 동굴내부에 대해 조사가 이루어지면서 작성되어진 것이다. 이를 바탕으로 동굴의 방향성을 추출하기 위해서는 방향성 선정의 기준이 필요하다. 기준이 없이 분석자의 주관적 판단에 의존하다보면 정확도와 자료의 신뢰도가 떨어질 수 있기 때문이다.

석회동굴 내 방향성 추출은 다음과 같이 10개의 기준을 바탕으로 이루어진다.

- ① 직선의 선형을 준다.
- ② 선형은 동굴 내 중심이 되도록 한다.
- ③ 가능하면 모든 선형은 연결되도록 한다.
- ④ 불확실한 방향성을 가진 방향성은 제시하지 않는다.
- ⑤ 선형이 바뀌는 변곡점의 경우 동굴 내 기존 형태를 이루는 최소한

정점으로 설정한다.

- ⑥ 주선형을 주고 외벽의 일부가 침식된 것으로 예상되는 지점은 주선형의 측선에서 출발하는 사교된 추가 선형을 준다. 이 때 추가 선형의 폭은 마지막 폭과 동일하게 연장된 것으로 가정한다.(가능하면 최소한으로 설정한다.)
- ⑦ 사교된 추가선형의 연장성이 강하여 연장성이 있는 것으로 예상되며 그 폭이 한쪽만 설정 가능할 경우 한쪽 폭이 다른 쪽 폭과 같다고 가정한다.
- ⑧ 주선형 옆면에 주선형 방향과 유사한 장방형의 공간이 위치하면 장축의 추가선형을 가정하고 추정되는 단축을 그 최대폭으로 설정한다.
- ⑨ 대형 광장의 형태를 이루는 경우 주선형의 방향성을 먼저 지정하고, 주선형의 형태가 추가로 있을 것으로 예상되면 추가적으로 주선형을 지정한다.
- ⑩ 대형 광장의 주변의 방향성을 가진 침식부는 대형광장의 주선형에서 연장된 것으로 가정한다.

2.4.2. 석회동굴 내 방향성 해석

석회동굴의 방향성은 전체 방향성에 대한 자료를 제시할 뿐 어느 방향이 우세하게 발달하고 있는지를 판단하기는 어렵다. 예를 들어, 2m의 연장성을 보이는 몇 개의 방향성과 50m의 주 방향성으로 판단되는 한 개의 방향성이 있을 경우 어느 방향성이 더 석회동굴 발달에 영향을 주었을까 하는 것이다. 따라서, 전체 석회동굴의 방향성 해석과 함께 연장성 해석도 필요하다.

예를 들어, 연장성을 판단함에 있어 발달된 방향성은 작은 형태(1m 이

하)에서 매우 큰 형태(20m 이상)로 다양하기 때문에 어느 기준을 두고 연장성에 가중치를 두어 판단하는지가 중요하다.

연장성 판단을 위해 동굴 내 방향성의 폭을 모두 추출한 후 전체 폭의 평균을 기준으로 판단하는 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 각 방향성의 폭에 대한 연장의 비율을 기준으로 판단하는 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)을 제시하고자 한다.

전체 석회동굴의 폭을 산출하기 위하여 연장성을 보이는 방향성의 5m 간격으로 폭을 측정하여 평균을 내어 산출하였다.

2.4.2.1. 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)

석회동굴의 형성은 주변의 다양한 요인의 영향을 받는다. 다양한 원인에 의해 형성된 석회동굴 내 크고 작은 발달 방향성은 전체를 대표할 수 있는 하나의 기준으로 판단할 수 있다. 석회동굴의 대표성을 연결된 동굴 내 모든 발달 방향성의 폭으로 가정한다면 전체 석회동굴 발달 방향성 폭들의 평균을 기준으로 이용할 수 있다는 결론에 도달한다.

이는 모든 폭에 대한 평균이기에 각각의 방향성을 따로 판단하는 것이 아닌 전체의 영향성을 두고 판단한다. 따라서 각 비율의 기준 이하는 가중치를 적용하지 않고 기준 이상이 되는 방향성에만 가중치를 적용하면 동굴 발달에 영향을 미치는 연장성 있는 방향성에 대한 해석이 가능하다.

연장성을 갖는 방향성에 대한 해석을 위해 전체 평균 폭의 비율에 따라 기준을 설정하고 기준 이상이 되는 방향성에만 가중치를 적용하는 해석 기법을 “평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)”으로 명명하

고, 해당 기준을 바탕으로 해석하였다.

연장성 해석을 위한 가중치 기준은 전체 평균 폭을 기준으로 1배, 2배, 3배, 5배를 바탕으로 하였다. 각 기준에 미치지 못하는 방향성이 전체 발달에 영향을 주고 있는지를 판단하기 위해서 기준치 미달을 포함한 경우와 불포함한 경우로 분류하여 해석하였다.

2.4.2.2. 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)

석회동굴의 형성은 다양한 요인의 영향을 받았지만 실제 동굴의 확장 및 발달을 보이는 방향성은 특정 방향성이 우세하기 때문에 발달이 나타난 것으로 판단할 수 있다. 일례로, 동굴 폭이 1m이고 그 연장성이 50m인 경우 발달성은 매우 우세함을 판단할 수 있다. 그러나 폭이 20m이고 연장성이 50m인 경우 동굴의 확장 및 발달이 혼재되어 있는 지점이거나 국부적 용식이 집중된 지역이지 연장 발달이 우세한 지역이라고 판단하기는 어렵다. 따라서, 각 발달 방향성의 연장성을 해당 폭에 대한 비율로 판단하여 해석할 필요가 있다.

“개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)”으로 명명한 이 해석법은 동굴 내 각 방향성의 평균 폭에 대한 연장성의 비율로 산출하는 방식이다. 각 발달 정도가 비례적으로 우세한 방향에만 연장성에 대한 가중치를 적용하는 방식이다.

이 해석법은 연장성 해석을 위한 방향성 발달 정도를 판단하는 기준이 필요하다. 발달 방향과 폭이 동일하다면 원의 형태를 이루어 방향성을 보인다고 할 수 없지만 방향성을 보이는 것은 타원을 이루고 매우 방향성이 우세하게 보이는 것은 폭에 대한 연장의 비율이 크음을 의미한다.

따라서, 가중치 결정은 각 방향성의 평균 폭에 대한 연장의 비율이 1.5배, 2배, 3배, 5배인 경우로 설정한다. 각 기준에 미치지 못하는 방향성에 대한 해석은 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 동일하게 기준치 미달을 포함한 경우와 불포함한 경우로 분류하여 해석하였다.

2.4.2.3. 방향성 해석을 위한 가중치 설정

가중치 설정 방식은 선구조의 연장성에 대한 가중치 설정 방식과 동일하다. 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)에서 설정한 각 가중치 설정 기준을 바탕으로 해당 기준보다 긴 연장성을 보이는 발달 방향성에만 가중치를 설정하는 것이다. 각 가중치 설정 기준에 대한 발달 방향성의 연장에 대한 비율로 가중치를 두도록 함으로써 기준 이상의 연장성에만 특징적으로 표시되게 하는 특성이 있다.

*If Persistence length of orientation \leq Criteria,
set weighting value = Basic*

*But Persistence length of orientation $>$ Criteria,
set weighting value = Basic $\times \frac{\text{Persistence length of orientation}}{\text{Criteria}}$*

2.5. RMR(Rock Mass Rating)

암반에 대한 자료를 정량적으로 분석하기 위한 암반분류법 중 RMR(Rock Mass Rating)은 Bieniawski(1973)에 의하여 발표된 후 여러 차례 수정과 보완을 통해 암반의 상태를 파악하는 용도로 지질공학 및 암반공학 분야에서 널리 활용되고 있다.

암석의 강도, RQD, 불연속면의 간격, 절리면의 상태, 지하수 상태 등의 인자를 연계 해석하여 암반을 분류한다. 적용되는 인자는 스캔라인 조사와 같은 현장조사 자료를 적용하여 해석하기에 매우 유용한 기법으로 Bieniawski(1989)의 수정된 RMR을 적용하는 것이 가장 타당할 것으로 판단된다.

본 연구에서도 국내 10개소의 지점에 대한 RMR을 분석하여 개략적이지만 석회동굴 주변의 암반상태를 파악하고 암반을 분류해 보고자 한다.

Table 2.4.1. Classification parameter and their rating in RMR(Bieniawski, 1989).

PARAMETER			RANGE OF VALUES							
1	Strength of intact rock material (MPa)		Point-load strength index	> 10	4~10	2~4	1~2	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
			Uniaxial compressive strength	> 250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5	<1
	Rating		15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality RQD(%)		90~100	75~90	50~75	25~50	< 25			
	Rating		20	17	13	8	3			
3	Spacing of discontinuities		> 2m	0.6~2m	200~600mm	60~200mm	< 60mm			
	Rating		20	15	10	8	5			
4	Condition of discontinuities	of	Discontinuity length (persistence/continuity, m)	< 1	1~3	3~10	10~20	> 20		
			Rating	6	4	2	1	0		
			Speration(aperture, mm)	None	<0.1	0.1~1.0	1~5	> 5		
			Rating	6	5	4	1	0		
			Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
			Rating	6	5	3	1	0		
			Infilling(gouge, mm)	None	Hard filling		Soft filling			
					< 5	> 5	< 5	> 5		
			Rating	6	4	2	2	0		
			Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Rating	6	5	3	1	0					
5	Ground water	Inflow per 10m tunnel length		None	<10 (litres/min)	10~25 (litres/min)	25~125 (litres/min)	>125 (litres/min)		
		ratio	$\frac{joint\ water\ pressure}{major\ principal\ stress}$	0	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	>0.5		
		general conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating		15	10	7	4	0		

Table 2.4.2. Rating adjustment for discontinuity orientations in RMR(Bieniawski, 1989).

Strike and Dip Orientations of Discontinuities		Very Favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very Unfavorable
Ratings	Tunnels and mines	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

Table 2.4.3. Rock mass classes determined from total ratings(Bieniawski, 1989).

Rating	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Class no.	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

3. 국내 석회동굴

국내 석회동굴의 지질공학적 특성을 파악하고자 동굴 내부 조사가 용이한 총 10개의 지역을 임의 선정하여 지질 해석, 광역 선구조 분석, 동굴 방향성 분석, 불연속면 특성 분석 등을 수행하였다.

3.1. 고수동굴

3.1.1. 현장 개요

고수동굴은 충청북도 단양군 단양읍 고수리에 위치한 자연 석회동굴로 남한강 상류의 등우봉(696m) 줄기인 고수봉(430m)에 위치하고 있다. 좌표는 동경 128° 23' 06" 북위 36° 59' 08"에 해당되는 지역이며 동굴의 입구는 해발 160m 지점에 위치한다(Fig. 3.1.1.).

1976년 9월 우리나라 천연기념물 제 256호로 지정되었으며 고수동굴의 위치는 과거부터 주민들에게 알려져 왔던 것으로 전해지고 있다. 동굴확인 당시, 부근에 펜석기와 간석기 등이 발굴되었다는 조사결과를 볼 때 고수동굴은 선사시대부터 주거지로 활용된 것으로 판단되는 지역이다(이영혜, 1998).

현재는 관광용으로 일반인에게 개방되어 있으며, 입구와 출구가 분리되어 있는 구조로 입구의 북동측 약 200여 m 이격된 지점에 출구가 있다.

고수동굴 주변의 수계는 남측에 서쪽에서 동쪽으로 흐르는 금곡천이 흐르는 지역으로 서측에 위치한 남한강에 합류되는 양상을 보이고 있다.

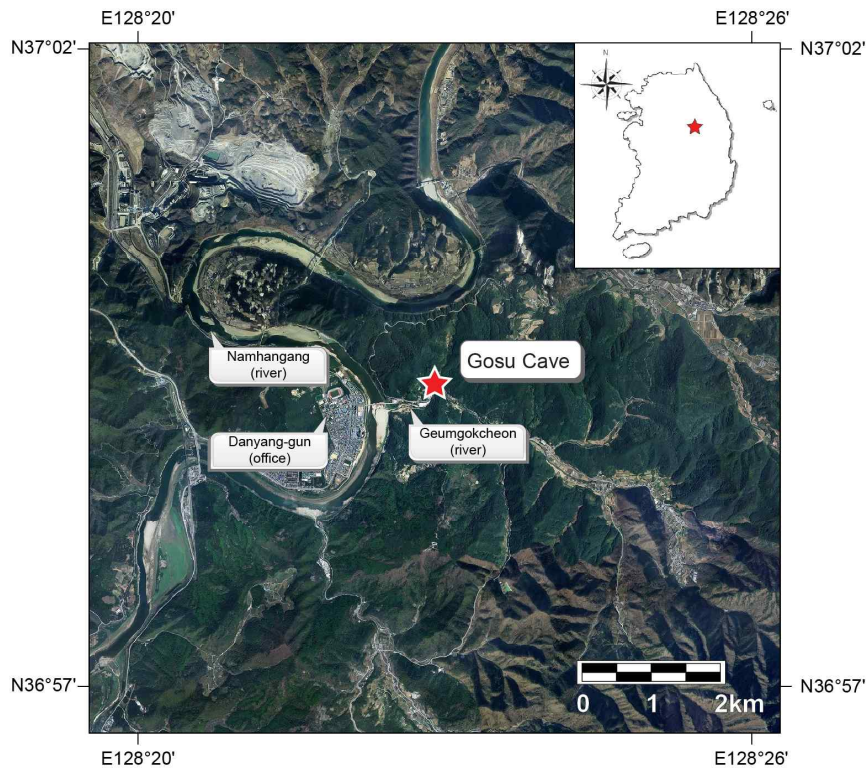


Fig. 3.1.1. Location map of Gosu Cave(based on Website map.naver.com).

3.1.2. 광역 선구조

고수동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.1.2).

전체 해당 구역의 선구조는 총 102개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선구조의 방향성을 분석한 결과, N0~10°W, N50~70°W, N30~40°E, N20~30°W 등이 주된 방향성으로 분포하는 것으로 분석되었다(Fig. 3.1.3). 해당 방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용하여 해석한 결과에서도 N50~60°W의 방향성이 매우 우세한 것으로 분석되었다(Fig. 3.1.4).

단순 방향성 분석과 연장성을 이용해 가중치를 적용한 분석에서 모두 우세하게 나타난 N50~60°W은 금곡천 및 남한강의 형성에 영향을 미쳤을 것으로 판단되며 고수동굴 형성에도 영향을 미쳤을 것으로 예상된다.

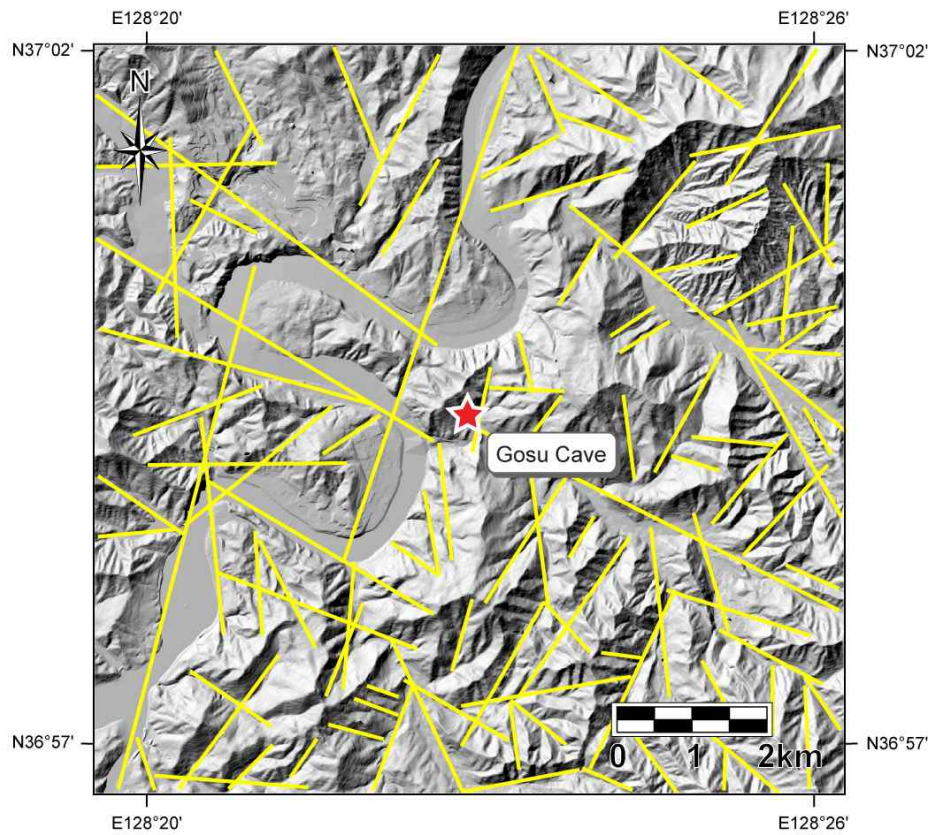


Fig. 3.1.2. Lineaments around Gosu Cave.

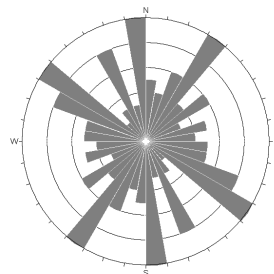
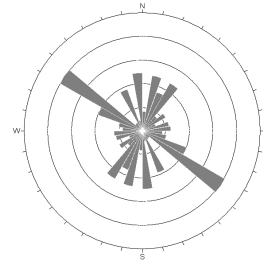
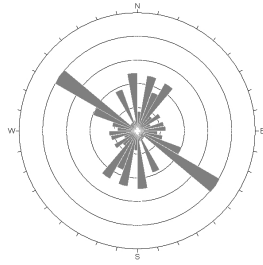
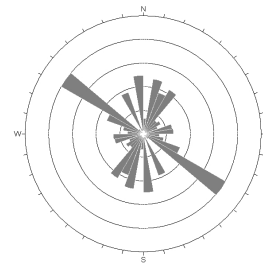
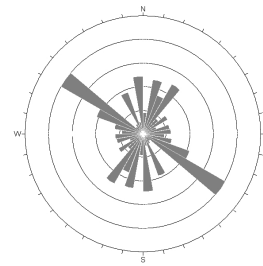


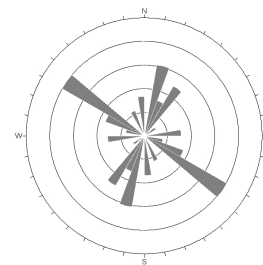
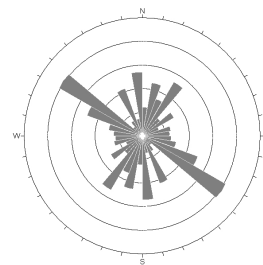
Fig. 3.1.3. Orientation analysis of lineaments around Gosu Cave.



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.1.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Gosu Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

3.1.3. 지질특성

1970년대 초부터 해당 지역에 대한 지질 분석이 다양하게 수행되었다. 국립지질조사소(1967)에 의하면 하부에서부터 장산규암층, 묘봉층, 고

성석회암층, 풍춘석회암층, 청동리층, 두무동층, 막골석회암층, 홍월리층, 삼태산층이 정합적으로 위치하고 있는 것으로 보고하고 있다. 또한 이 위에 정합상태로 홍점통과 사동통, 고방산통이 위치하는 세 지층이 부정합으로 놓여있는 것으로 제시하고 있다.

막골석회암층 하부에 고방산통이 분포하는 특성을 제시하며 그 원인은 명확하게 제시하고 있지는 못하다(Fig. 3.1.5).

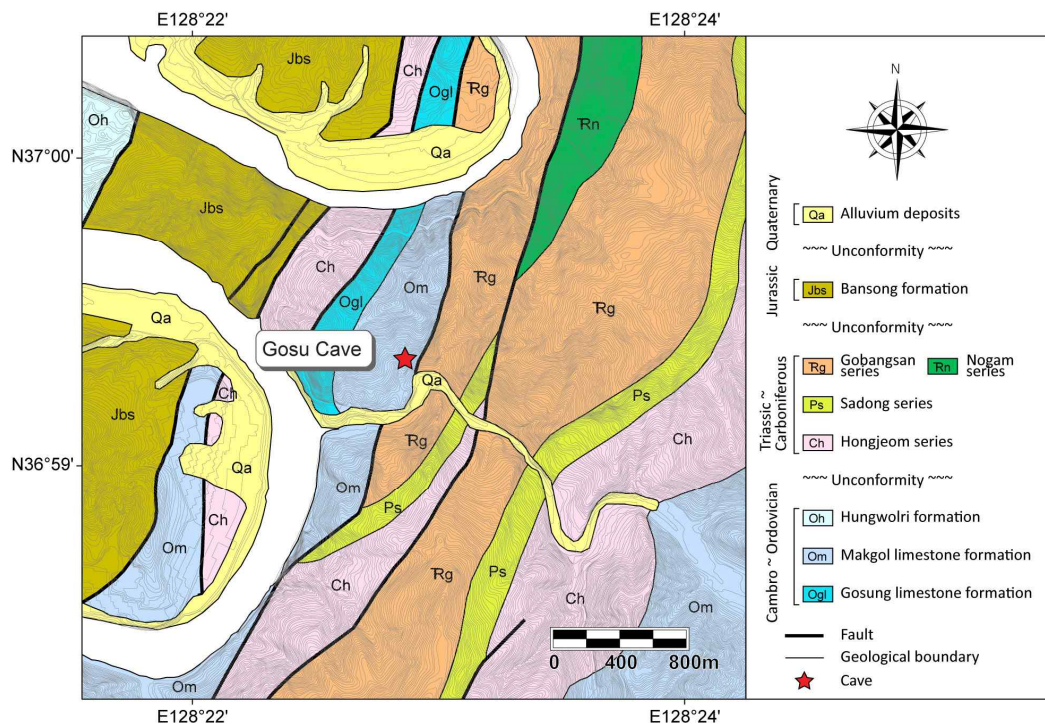


Fig. 3.1.5. Geologic map of Gosu Cave(by Korea Geological Survey[1967]).

고수동굴이 위치한 막골석회암층은 N40~50°E/60~70°NW의 방향성을 가지고 분포하고 있는 것으로 보고하고 있다.

정창희(1993)에 의하면 고수동굴의 석회암층은 고생대 오르도비스기에

생성된 막골석회암층이며 상부에 고성석회암층이, 하부에 함백산층이 있는 것으로 해석하였다. 막골석회암층 하부에 두모동층, 동점규암층, 화절층, 대기석회암층이 없이 함백산층(고방산계 하부)이 바로 나타나는 특징을 보이는데 이는 고수동굴 동측에 고수리단층(역단층)의 영향으로 해석하였다. 고수리단층 동측에 추가 역단층인 사평리단층이 위치하는 것으로 보고하고 있다.

막골석회암층의 해석은 다소 상이한 형태를 이룬다. 국립지질조사소(1967)의 보고에 의하면 해당 지층은 주향 N40~60°E, 60~70°NW로 250~350m의 층후를 보이는 회백색의 석회암으로 해석하고 있다. 정창희(1993)는 주향 N0~40°E, 30~40°NW로 약 300m의 층후를 보이는 것으로 해석하였다.

이혜영(1998)은 고생대 오르도비스기의 상부에 해당하는 조선계 대석회암통의 중부에 속하는 두모동 석회암층에 배태되어 있는 것으로만 해석하고 있으며 연대는 약 4~5억 년 전에 이뤄진 지층으로 해석하였다.

선구조 해석에서 고수동굴 주변에 N12°E의 주향을 보이는 선구조와 동측에 N37°E의 주향을 보이는 선구조가 고수리 단층과 사평리 단층인 것으로 판단되며 고수리 단층이 막골석회암과 고방산계하부 함백산층을 지구조적으로 구획하고 있는 것으로 판단된다.

3.1.4. 동굴특성

고수동굴은 지표에서 유입된 지표수에 의해 수직적인 용식이 발달하고 이후 수평적인 용식이 다양하게 발달된 동굴이다(이영혜, 1998; 정창희, 1993; 홍시환, 1997).

과거 남한강과 금곡천의 지하수위는 지금의 수위보다 높아 고수동굴의 고도와 유사한 지점에 위치한 상태에서 고수리 단층 주변을 따라 수직적

인 용식이 발달하고 이후 수평적 용식이 발달하며 동굴이 형성된 것으로 파악된다. 이후 지하수위가 낮아지며 고수동굴 내에 중유석, 석순, 석회화단구, 석주, 커어튼중유, 동굴산호, 천정구, 연못 등과 같은 2차생성물이 나타나는 것으로 해석된다.

고수동굴의 총 길이는 약 1,700여 m 이며, 주요 관람로인 1층과 상부에 발달된 동굴층으로 이루어져 있다(Fig. 3.1.6). 1976년, 1983년, 1989년 총 3차에 걸쳐 동굴내부의 관광루트가 개발되었다. 개방동굴 구간 외에 안전과 학술적 가치 보호를 위한 미공개 루트도 있지만 정확한 상태는 지속적 연구가 필요하다.

홍현철(2008)에 의해 제시된 고수동굴의 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.1.6). 추출된 방향성은 총 49개로 방향성을 분석하면 Fig. 3.1.7과 같다.

추출된 방향성만을 분석한 결과, 고수동굴 발달의 방향성은 $N60\sim70^{\circ}E$ 이 가장 우세하며 부수적으로 $N0\sim20^{\circ}W$, $N30\sim40^{\circ}W$ 등이 우세한 것으로 나타나고 있다(Fig. 3.1.7).

연장성 해석을 위해 전체 폭의 평균을 산출한 결과, 약 5.67m인 것으로 분석되었다. 이를 기준으로 할 때, 전체 방향성이 평균 폭보다는 연장성이 큰 것으로 해석되었다. 평균의 2배를 기준으로 할 경우 37개의 방향성이 가중치에 적용되며, 평균의 3배를 기준으로 하면 26개, 5배를 기준으로 하면 14개의 방향성에 가중치가 적용된다. 또한, 각 방향성의 폭에 대한 연장성 비율을 보면 1.5의 경우 46개, 2의 경우 42개, 3의 경우 28개, 5의 경우 17개의 방향성이 가중치에 적용된다(Table 3.1.1).

관련 자료를 바탕으로 연장성을 이용해 가중치를 적용하여 해석한 결과 Fig. 3.1.8과 Fig. 3.1.9와 같다.

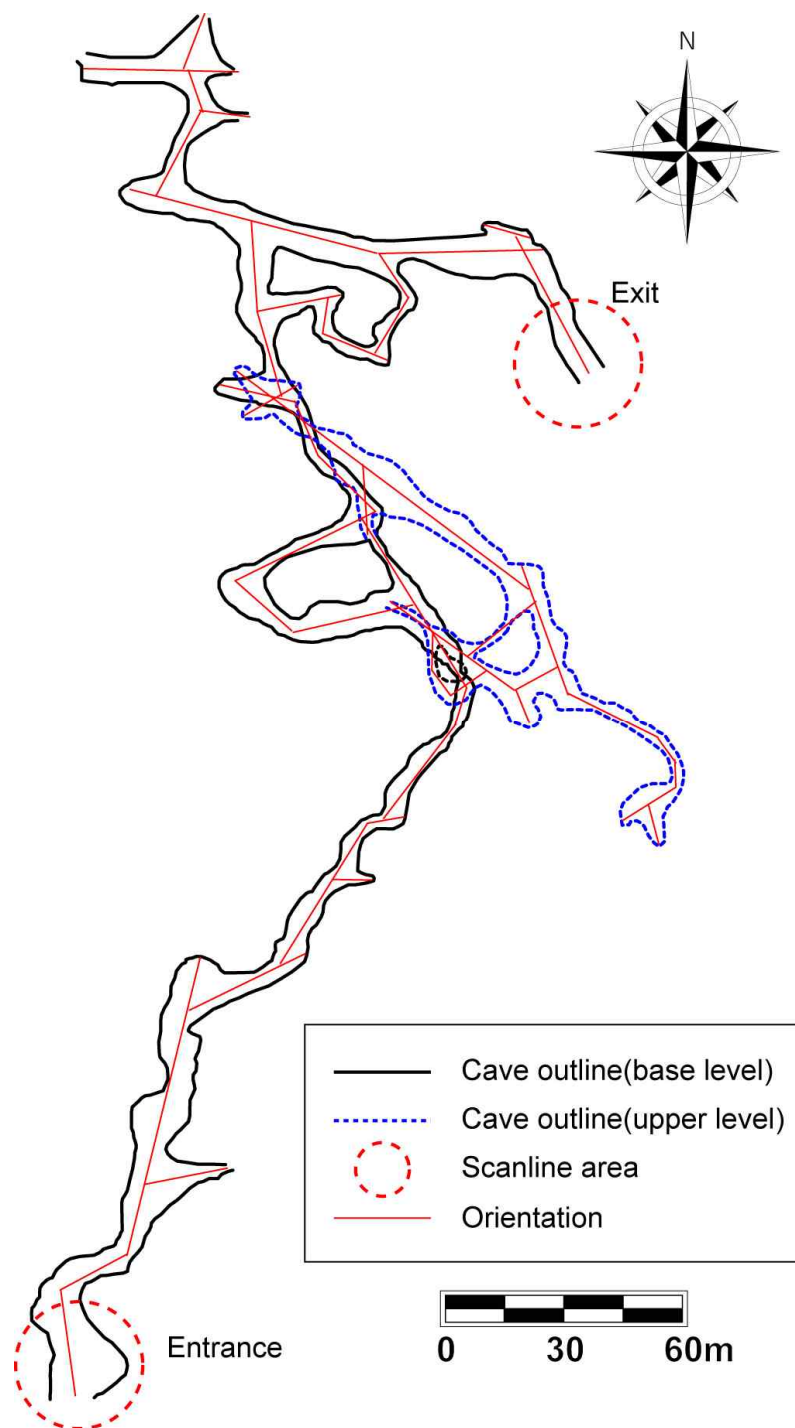


Fig. 3.1.6. Orientation in Gosu Cave(based on Hong[2008]).

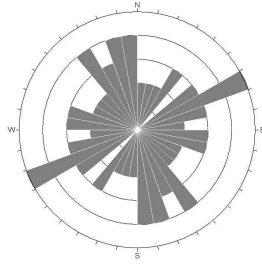


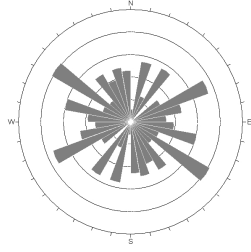
Fig. 3.1.7. Orientation analysis in Gosu Cave.

Table 3.1.1. Weighting for persistence in Gosu Cave.

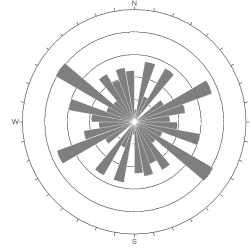
		Details			
Total orientation		49			
Average span(m)		5.7			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	49	37	26	14
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	46	42	28	17

단순 방향성 분석에는 N60~70°E이 가장 우세하게 나타났지만, 연장성을 이용한 가중치가 적용된 해석에서는 전체적으로 N50~60°W의 방향이 상대적으로 우세하게 나타나고 있다.

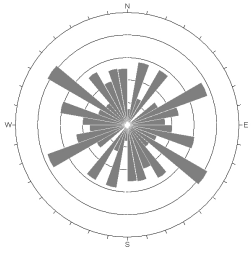
평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 적용에 따라 이차적으로 우세한 방향성이 다소 차이를 보인다. Fig. 3.1.8에서 보는 바와 같이 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용한 경우 N50~60°W과 함께 N60~70°E이 가장 우세하게 나타나고 있다.



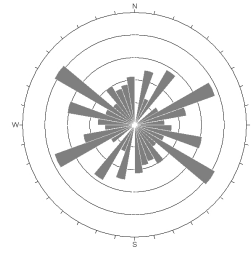
(a) including below criteria(1)



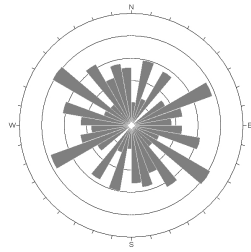
(b) excluding below criteria(1)



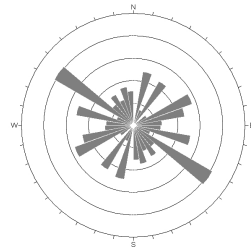
(c) including below criteria(2)



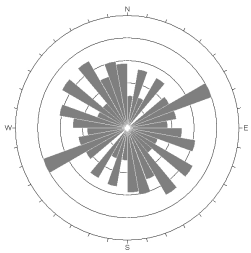
(d) excluding below criteria(2)



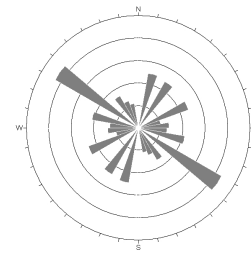
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



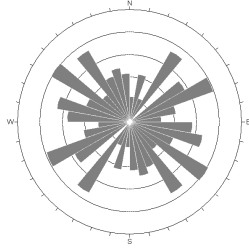
(g) including below criteria(5)



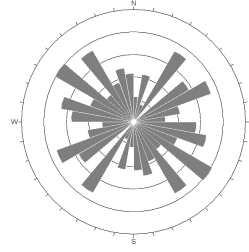
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.1.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Gosu Cave.

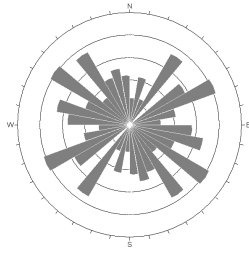
** Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio*



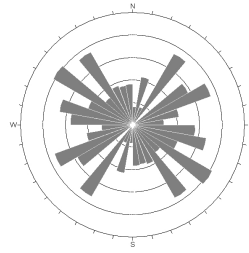
(a) including below criteria(1.5)



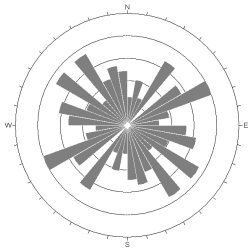
(b) excluding below criteria(1.5)



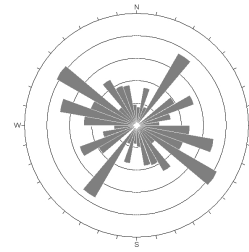
(c) including below criteria(2)



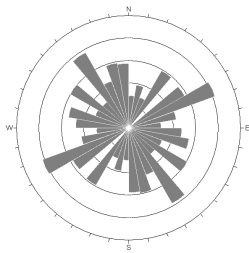
(d) excluding below criteria(2)



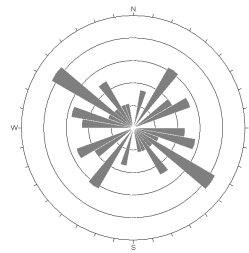
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.1.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Gosu Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

그러나, 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 해석에 의하면 N50~60°W과 함께 N30~40°E, N30~40°W, N60~70°E 이 함께 나타나고 있으며 가중치 설정기준 및 기준이하 방향성 포함여부에 따라 우세정도가 다소 차이를 보이고 있다.

이러한 제반 특성을 고려할 때 광역 선구조 분석에서 나타난 결과와는 상이한 결과로 고수동굴의 발달은 광역 선구조(10km×10km)의 영향성보다는 국부적인 지구조 영향에 의해 발달되었을 가능성이 큰 것으로 판단된다. 이는 고수동굴이 위치한 막골석회암층의 층리면을 따라 발달하거나 고수동굴 주변에 위치한 고수리단층과 사평리단층의 영향이 컸을 것으로 판단된다.

3.1.5. 불연속면 특성 분석

고수동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 고수동굴 입구와 출구지점에서 현장조사를 수행하였다.

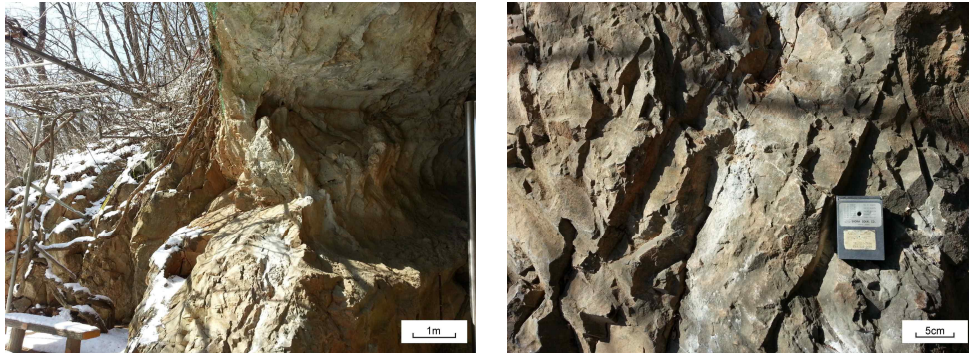
고수동굴의 입구는 내부 입구와 이격된 상태로 외부와 연결되어 있으며 입구 좌측과 우측이 자연 사면상태로 위치하고 있다(Fig. 3.1.10).

암회색의 색상을 보이고 있으며 일부 풍화된 표면의 경우 담갈색 내지 황갈색의 테라로사(terra rossa)가 노두를 일부 덮고 있거나 불연속면 틈새를 충전하고 있다. 주로 층리면을 따라 용식된 스폰지워크(sponge work) 현상이 두루 확인되고 있다.

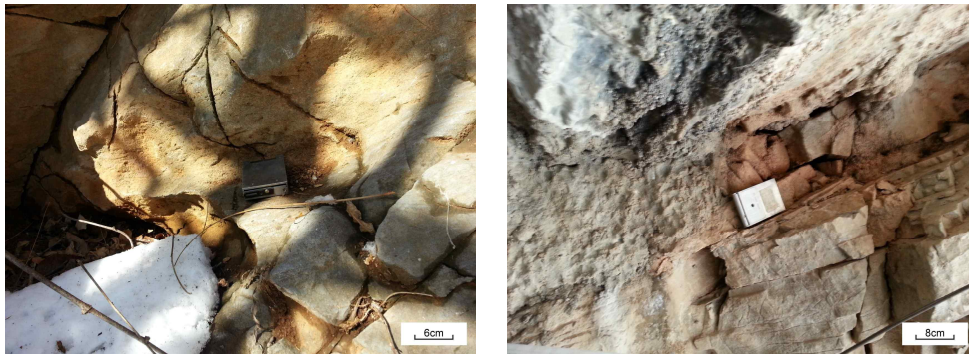
고수동굴의 출구는 내부 출구 안에 있는 상태이고 관람로 개설을 위해 보수가 이루어진 상태이다. 주로 암회색의 색상을 보이고 있으며 벽면에 물기가 지속적으로 미세하게 흐르고 있는 상태이며 풍화의 진행은 거의

없는 것으로 판단된다(Fig. 3.1.11).

그러나 벽면을 자세히 보면 지표수의 유입에 따른 미세한 용식이 있는 것으로 판단되며 일부 표면용식이 점차 나타나고 있는 것으로 판단된다.



(a) Left lateral



(b) Right lateral

Fig. 3.1.10. Gosu Cave Entrance.

고수동굴의 입구와 출구 각각 2지점(좌측면, 우측면), 총 4개 지점에 대해 스캔라인 조사(Scan-line Survey)를 수행하였다.

3.1.5.1. 고수동굴 입구 좌측

해당 암사면의 조사구간은 약 9m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된

불연속면의 개수는 총 64개이다.



(a) Left lateral



(b) Right lateral

Fig. 3.1.11. Gosu Cave Exit.

입구 좌측면의 지반상태를 파악하기 위하여, 불연속면의 방향성(orientation), 간격(spacing), 연속성(persistence), 틈(aperture), 충전상태(infilling), 누수상태(seepage), 슈미트해머(schmidt hammer)를 이용한 강도 등을 조사하고 분석을 수행하였다.

입구 좌측부의 불연속면의 방향성을 확인한 결과 주 불연속면의 방향(set 1)은 $N5^{\circ}W/62^{\circ}SW$ 으로 주 층리방향이며, $N73^{\circ}W/80^{\circ}NE$, $N54^{\circ}W/81^{\circ}SW$, $N87^{\circ}W/64^{\circ}SW$, $N77^{\circ}E/86^{\circ}SE$ 의 다른 불연속면 방향성이 주 불연속

면을 사교하며 분포하는 것으로 분석되었다(Table 3.1.2).

이러한 방향성의 특성은 Fig. 3.1.3에서 보는 바와 같이 광역 선구조에서도 유사하게 나타난 것으로 N50~60°W의 선구조가 고수동굴 주변에 강하게 영향을 주어 나타나는 특성을 보이는 것으로 판단된다.

동굴도의 방향성과 연계하여 해석할 때 동굴 입구 용식의 방향성(N8°W)과 동굴의 주 방향성(층리)방향과도 일치하는 것으로 보아 입구부의 용식은 층리면을 따라 진행되었음을 예상할 수 있을 것으로 판단된다.

불연속면의 간격은 보통의 정도(moderate spacing)를 보이며, 연속성은 낮은~보통의 정도(low~medium persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태를 보이는 것으로 분석되었다.

3.1.5.2. 고수동굴 입구 우측

입구 우측면의 조사는 약 6.5m 구간에서 수행하였으며, 확인된 불연속면의 수는 총 20개다.

우측면의 경우 좌측면에서 비해 풍화면 용식(스폰지워크 등)이 상당히 진행된 것으로 확인되고 있다.

불연속면의 방향성을 분석한 결과 좌측면과는 달리 N39°W/31°NE(set 1), N57°E/57°SE의 방향성을 보이고 있는 것으로 나타났다. 좌측면과 유사하게 불연속면 군이 서로 사교하는 형태를 보이고 있기는 하지만 좌측면과의 방향성과는 다소 상이한 형태를 보이고 있다(Table 3.1.3).

불연속면의 간격은 보통 정도(moderate spacing)를 보이며, 연속성은 낮은~보통의 정도(low~medium persistence)를 보인다.

Table 3.1.2. Discontinuities of Left lateral of Gosu Cave Entrance.

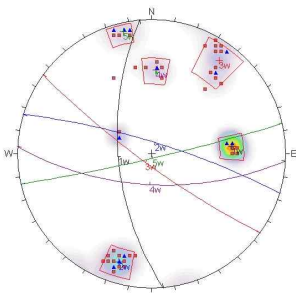
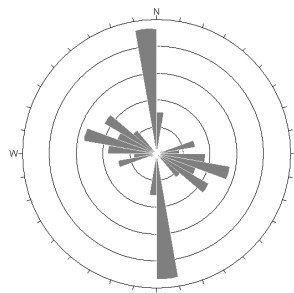
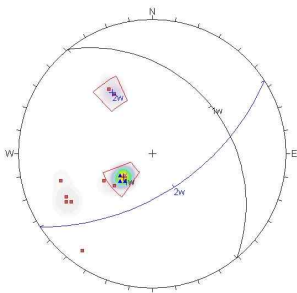
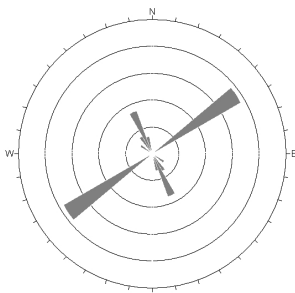
		Details					
Scanline length		9m		Trend/plunge		000/00	
Number of Discontinuities		64					
Stereonet							
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)	Set 4 (joint)	Set 5 (joint)	
		N5°W	N73°W	N54°W	N87°W	N77°E	
		62°SW	80°NE	81°SW	64°SW	86°SE	
Spacing (cm)	Mean	25.20	19.00	20.37	24.19	2.50	
	S.D.	12.11	58.17	34.82	60.90	1.31	
Persistence (m)	Mean	3.88	2.14	4.64	1.89	3.08	
	S.D.	0.23	0.23	2.60	0.33	2.11	
Roughness (0~20)	Mean	3.50	4.56	7.14	4.67	3.44	
	S.D.	0.53	0.92	2.57	1.00	0.53	
Aperture (mm)	Mean	0.00	0.56	2.39	1.33	0.00	
	S.D.	0.00	0.51	0.49	0.50	0.00	
Infilling		mainly sand and silty sand, partially open					
Seepage		mainly wet, partially dry including the trace of leakage					
Strength (MPa)		48.14	42.1	15.41	–	–	

Table 3.1.3. Discontinuities of Right lateral of Gosu Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		6.5m	Trend/plunge	040/00
Number of Discontinuities		20		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	
		N39°W	N57°E	
		31°NE	57°SE	
Spacing (cm)	Mean	20.74	32.36	
	S.D.	50.19	—	
Persistence (m)	Mean	2.50	5.00	
	S.D.	0.67	0.00	
Roughness (0~20)	Mean	2.25	5.00	
	S.D.	0.87	0.00	
Aperture (mm)	Mean	0.15	2.00	
	S.D.	0.55	0.00	
Infilling		mainly sand and silty sand, partially open		
Seepage		mainly wet, partially dry including the trace of leakage		
Strength (MPa)		17.79	—	

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 폐쇄형(closed features) 내지는 틈새형(gapped features)의 형태를 보이는 것으로 분석되었다.

3.1.5.3. 고수동굴 출구 좌측

출구 좌측면 약 5.5m 구간에서 스캔라인 조사를 수행하였으며, 확인된 불연속면의 수는 총 34개다.

입구의 좌우측면에 비해 석회암 용식의 진행은 관찰되지 않지만 출구 내부와 외부의 기온차로 인해 매우 습한 상태이며 일부 지속적인 누수가 확인되는 상황이다.

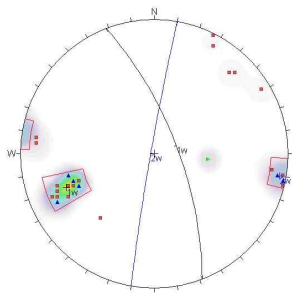
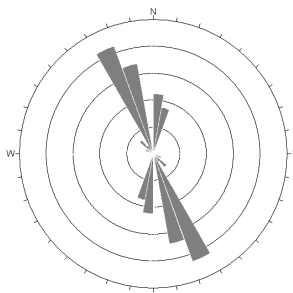
불연속면의 방향성을 분석한 결과 $N21^{\circ}W/70^{\circ}NE$ 과 $N10^{\circ}E/87^{\circ}NW$ 의 방향성이 확인되었으며 주향방향이 주로 남북방향을 이루는 형상을 보이는 것으로 분석되었다(Table 3.1.4). 동굴 입구 좌측면에서 분석된 주 방향성인 $N5^{\circ}W/62^{\circ}SW$ 과 비교해 보면 경사면 방향이 상이한 특성을 보이지만 주향은 유사한 것으로 해석된다.

$N21^{\circ}W/70^{\circ}NE$ 의 방향성은 동굴도 출구부의 방향성과도 거의 유사한 방향성으로 입구와 다른 방향성의 지구조적 인자의 영향을 받은 것으로 해석된다.

불연속면의 간격은 보통 정도(moderate spacing), 연속성은 낮은~보통의 정도(low~medium persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 폐쇄형(closed features) 내지는 틈새형(gapped features)의 형태를 보이는 것으로 분석되었다.

Table 3.1.4. Discontinuities of Left lateral of Gosu Cave Exit.

		Details		
Scanline length		5.5m	Trend/plunge	350/00
Number of Discontinuities		34		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (bedding)	
		N21°W	N10°E	
		70°NE	87°NW	
Spacing (cm)	Mean	35.24	52.23	
	S.D.	50.32	62.95	
Persistence (m)	Mean	1.63	1.71	
	S.D.	0.47	0.39	
Roughness (0~20)	Mean	4.06	5.43	
	S.D.	1.61	0.98	
Aperture (mm)	Mean	0.00	0.86	
	S.D.	0.00	0.38	
Infilling		mainly closed, partially open(or filling with silt)		
Seepage		mainly wet or leakage		
Strength(MPa)		18.57	—	

3.1.5.4. 고수동굴 출구 우측

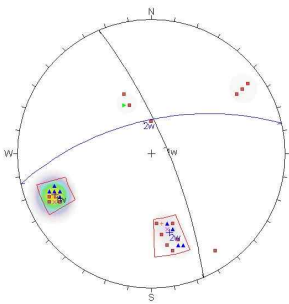
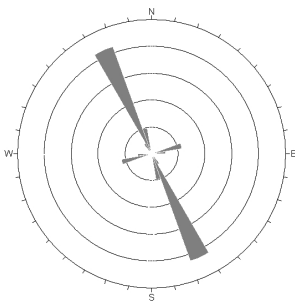
출구 우측면은 좌측면과 나란한 벽면상태를 보이는 지점으로 약 4m 이격된 면이다. 조가구간은 약 5.0m 이며, 확인된 불연속면의 수는 총 34개다(Table 3.1.5).

전체적으로 좌측면과 동일한 암상태를 보이고 있으며 특이할 점은 다소 새로운 방향성을 보이는 불연속면들이 일부 확인된다.

불연속면의 주 방향성은 $N23^{\circ}W/76^{\circ}NE$ 로 좌측면과 동일한 형상을 보이고 있으나 부 방향성은 $N77^{\circ}E/62^{\circ}NW$ 로 나타나고 있다.

불연속면의 간격, 연속성, 거칠기 등은 좌측면과 유사하다.

Table 3.1.5. Discontinuities of Right lateral of Gosu Cave Exit.

		Details		
Scanline length		5.0m	Trend/plunge	350/00
Number of Discontinuities		55		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	
		N23°W	N77°E	
		76°NE	62°NW	
Spacing (cm)	Mean	10.39	19.88	
	S.D.	21.97	43.12	
Persistence (m)	Mean	1.98	1.93	
	S.D.	0.11	0.17	
Roughness (0~20)	Mean	2.82	3.48	
	S.D.	1.01	0.90	
Aperture (mm)	Mean	0.05	0.13	
	S.D.	0.21	0.34	
Infilling		mainly closed, partially open(or filling with silt)		
Seepage		mainly wet or leakage		
Strength(MPa)		19.94	—	

3.2. 고씨동굴

3.2.1. 현장 개요

고씨동굴은 강원도 영월군 김삿갓면 진별리에 위치한 자연 석회동굴로 태화산(1,027m) 줄기의 북서서측에 위치하고 있으며 동굴의 입구는 해발 180m이다. 동측에 남한강이 흐르고 있다(Fig. 3.2.1).

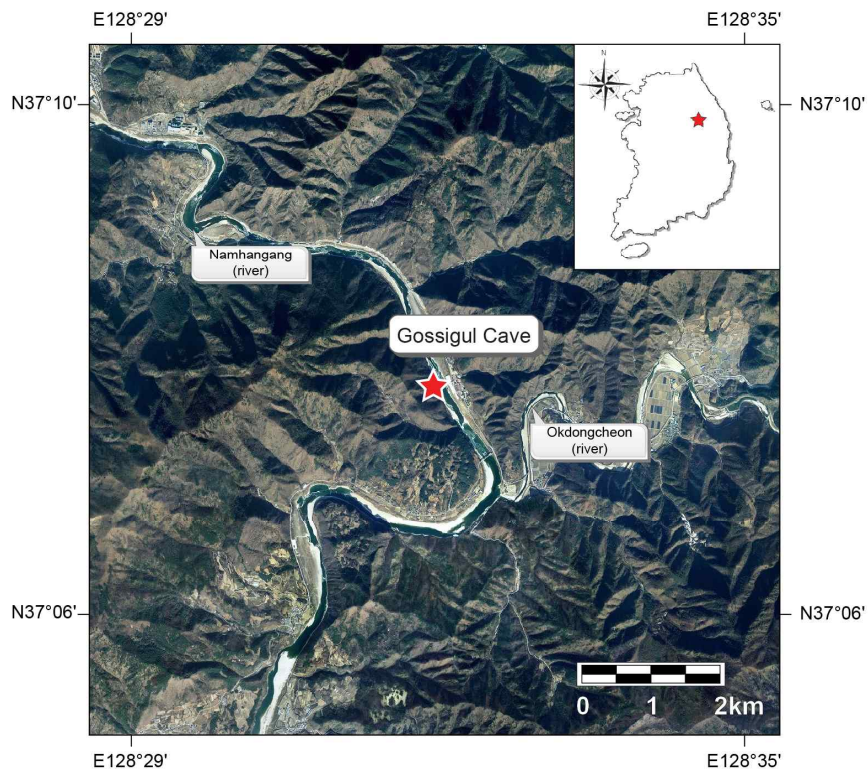


Fig. 3.2.1. Location map of Gossigul Cave(based on Website map.naver.com).

1969년 6월 우리나라 천연기념물 제 219호로 지정되었으며 과거 임진왜란 당시 고씨일가가 피신하였다고 해서 고씨라는 명칭으로 불려지고

있다.

입구와 출구가 하나로 되어 있는 동굴로 되어 있으며 매표소에서 동굴 진입을 위한 다리를 통해 일반인에게 개방되어 있다.

3.2.2. 광역 선구조

고씨동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.2.2).

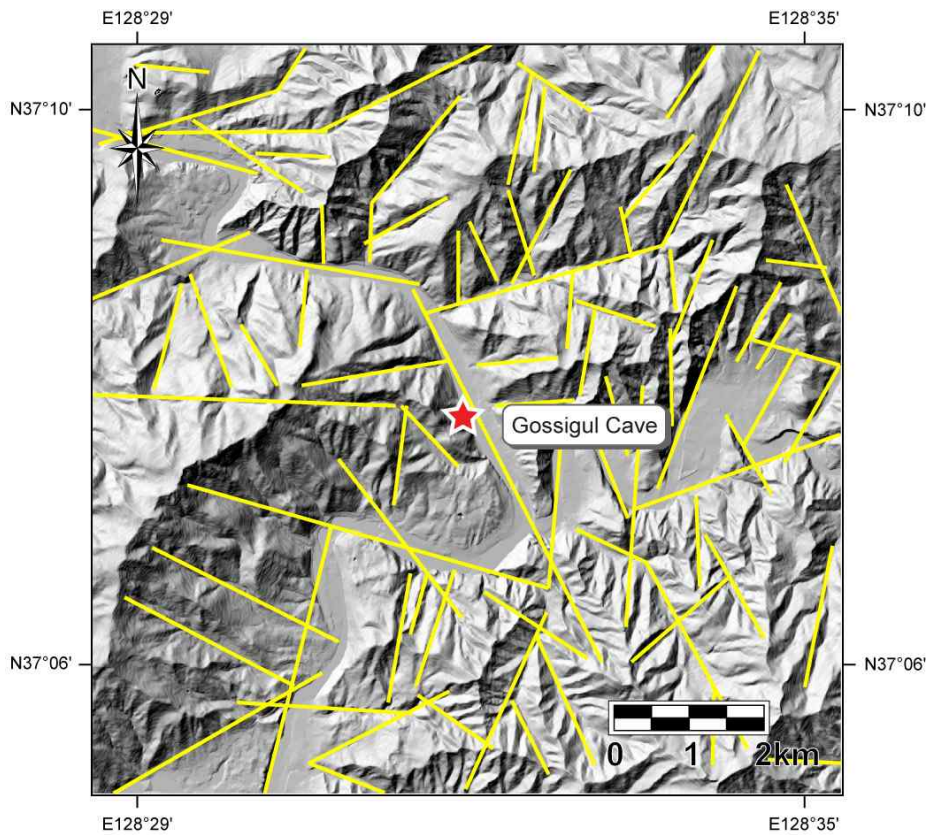


Fig. 3.2.2. Lineaments around Gossigul Cave.

전체 해당 구역의 선구조는 총 82개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선 구조의 방향성만을 분석한 결과, N20~30°W과 N0~30°E의 방향성이 우

세하게 나타나고 있으며 부수적으로 N70~90°W과 N60~70°E도 분포하는 것으로 해석되었다(Fig. 3.2.3).

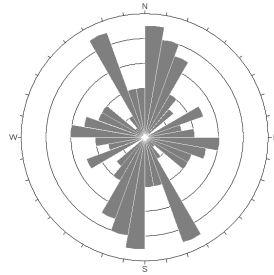


Fig. 3.2.3. Orientation analysis of lineaments around Gossigul Cave.

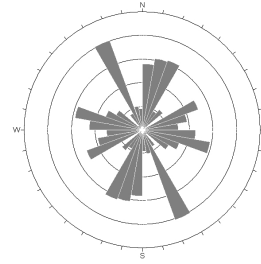
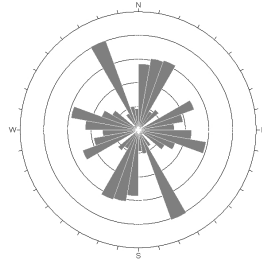
연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 유사한 패턴을 보이고 있는 것으로 분석되었다. N20~30°W과 N0~30°E의 방향성이 연장성에서도 상대적으로 우수한 것으로 나타나고 있으며, Fig. 3.2.4 (f)에서 보는 바와 같이 기준이 2km 이상인 경우에는 다소 새로운 결과를 보이고 있다. 이는 고씨동굴 주변의 N20~30°W과 N0~30°E의 방향성은 주로 2km 이하의 방향성이 우세하게 분포하기 때문으로 판단된다.

전체적으로 볼 때, N20~30°W과 N0~30°E의 방향성이 남한강 형성 및 지류 형성에 영향을 준 것으로 판단되며, 고씨동굴의 경우 주변에 위치한 N70~80°W과 N30~40°W이 주된 영향을 주었을 것으로 판단된다.

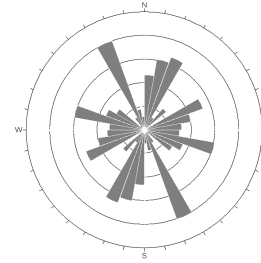
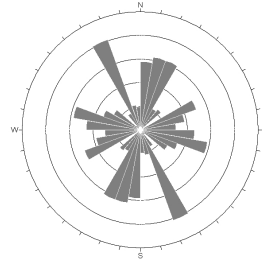
3.2.3. 지질특성

국립지질조사소(1966)에 의하면 하부에서부터 캄브리아기의 장산규암층, 묘봉층, 풍춘석회암층, 화절층, 오도비스기의 동점규암층, 두무동층, 막골석회암층이 정합적으로 위치하고 있다. 이 위에 시대미상의 고성세

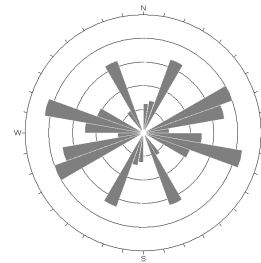
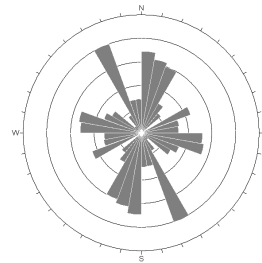
일층, 고성석회암층, 페름기의 사동통, 트라이아스기의 고방산통이 정합적으로 분포한다고 제시하고 있다(Fig. 3.2.5).



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.2.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Gossigul Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

고씨동굴이 위치하고 있는 지역은 막골석회암층 내지 고성석회암층으

로 해석하고 있으며 명확한 방향을 제시하고 있지는 못하다. 또한 고씨동굴 주변에 막골석회암층과 고성석회암층의 경계가 부정확한 것으로 보아 관계미상의 지구조적 패턴이 있는 것으로 판단하고 단층의 형태를 제시하였다.

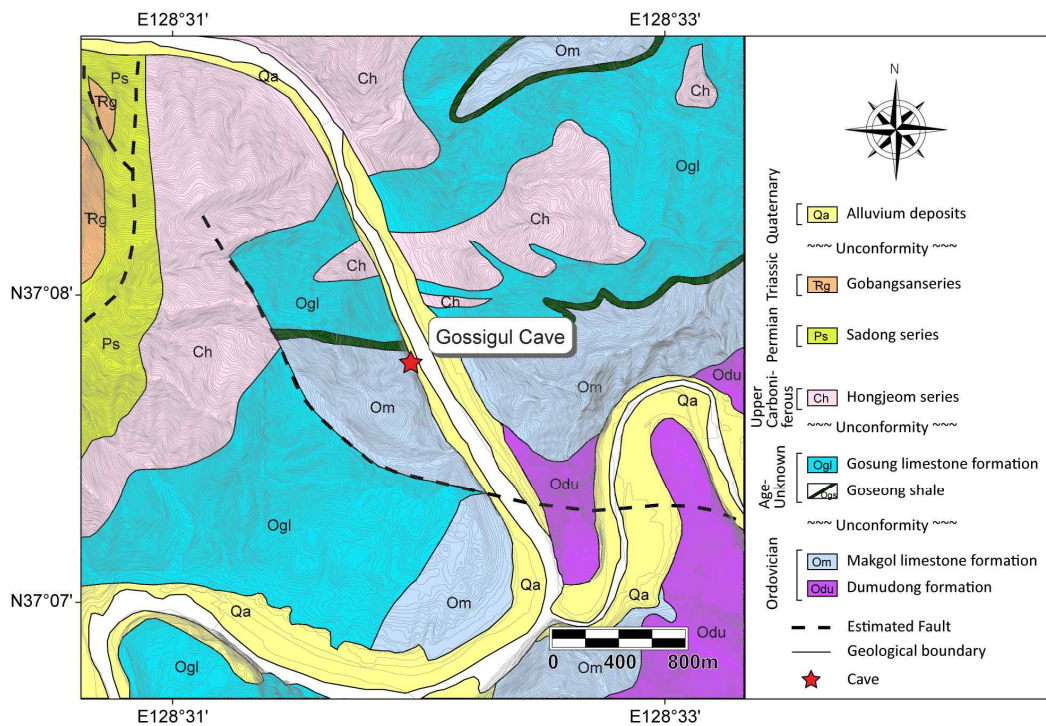


Fig. 3.2.5. Geologic map of Gossigul Cave(by Korea Geological Survey[1966]).

홍시환(1986)에 의하면 고씨동굴 주변은 옥천지향사의 비변성대 내에 위치하고 있으며 공수원트러스트(thrust)에 의해 상당히 복잡한 지질구조가 위치하고 있는 것으로 판단하였다. 지질계통은 기존 연구와 유사하게 하부에서 장산규암층, 묘봉층, 풍촌석회암층, 화절층, 동점규암층, 두무동층, 막골석회암층, 고성세일층, 고성석회암층, 사동통, 고방산통이 분포한

다고 보고하고 있다. 이 중에서 기존 연구와 다소 상이한 것은 고씨동굴 주변은 막골석회암층의 경계가 아니라 고성석회암층이 넓게 분포하는 것으로 해석하고 있다는 점이다.

또한, 김련(2003)은 하부에서부터 장산층, 묘봉층, 대기층, 화절층, 동점층, 두무골층, 막골층, 직운산층, 두위봉층이 정합적으로 위치하고 있으며, 이를 평안누층군의 만항층이 부정합상태로 덮고 있다고 보고하고 있다. 고씨동굴이 위치하는 지점의 경우 막골층이 넓게 분포하는 지점으로 해석하고 있으며 상부의 직운산층과 두위봉층이 남한강 건너편에서 다른 위치에 나타나는 특성을 파악하고 남한강일대에 단층이 위치하고 있음을 제시하고 있다. 막골층의 주요 층리는 $N15\sim45^{\circ}E/60\sim85^{\circ}NW$ 의 방향성을 보이며 분포하는 것으로 보고하고 있다.

김련은 2011년 연구에서 고씨동굴이 위치한 막골층 최하부에는 조류엽층리(lamination)가 발달한 석회암과 생교란 작용을 받은 석회암이 서로 교호하고 있다고 보고하고 있다.

고씨동굴이 위치한 지질은 막골층의 분포로 판단되며, 해당지역 주변에 습곡의 흔적이 일부 확인되는 것으로 보아 지구조적 변화가 많았던 지역은 확실한 것으로 판단된다.

3.2.4. 동굴특성

홍시환(1986)에 의하면 선형동굴로 토출형 동굴이며 경사굴로 제시하고 있다. 이는 포화대에서 공동 내 형성되는 광장의 발달이 미약하고 지표수가 유입되어 지하수의 흐름 중에 일부 침식이 발생하고 동굴입구부분에 이르러 복류(伏流)하여 남한강으로 토출유입하며 형성된 것으로 해석하고 있다.

오종우(1994)에 의하면 고씨동굴은 남한강의 하성작용에 의해 동굴의

상부가 건조한 특성을 보이는 반수하동굴(半水下洞窟 Vadose cave)로 해석하고 있으며 하천이 하강함에 따라 2차적 삼투력의 확장작용에 의해 형성된 것으로 보고 있다. 또한 습곡과 단층, 층리면 등 구조지질학적 특성에 의해 동굴의 주향이 발달한 것이며 이로 인해 내부의 2차 생성물 역시 경사가 급하고 지굴의 발달이 다양한 것으로 해석하고 있다.

김련(2003)의 연구에 따르면 고씨동굴은 주굴은 층리면을 따라서, 지굴은 절리면을 따라서 형성된 것으로 해석하고 있다. 지표수의 유입으로 동굴 내 절리면, 층리면, 습곡축 등의 영향을 받아 선택적으로 석회암을 용식시켜 형성되었으며 지굴패턴을 보아 측방 및 하각 침식작용으로 확장된 것으로 보고 있다. 후기에는 층리면을 따라 분리된 낙석이 동굴의 형성에 추가적 영향을 미친 것으로 해석하고 있다. 또한, 공동의 방향성은 $N0\sim74^{\circ}E$ 의 방향성이 나타나며 $N30\sim44^{\circ}E$ 방향이 매우 우수하게 발달하고 있는 것으로 분석하고 있다.

고씨동굴의 총연장은 약 3km인 것으로 알려지고 있다. 4개의 큰 공동 및 협곡이 있고 종유석, 석순, 동굴진주, 산호 등의 2차 생성물이 분포하고 있다. 동굴의 보호를 위해 공개지역과 미공개지역으로 구분되어 일반인에게 개방되고 있다.

김련(2011)에 의해 제시된 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.2.6). 추출된 방향성은 총 324개로 방향성을 분석하면 Fig. 3.2.7과 같다.

고씨동굴의 발달 방향성은 $N0\sim20^{\circ}E$ 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, 이차적으로 $N70\sim90^{\circ}E$, $N0\sim10^{\circ}W$ 등이 우세한 것으로 나타나고 있다(Fig. 3.2.7).

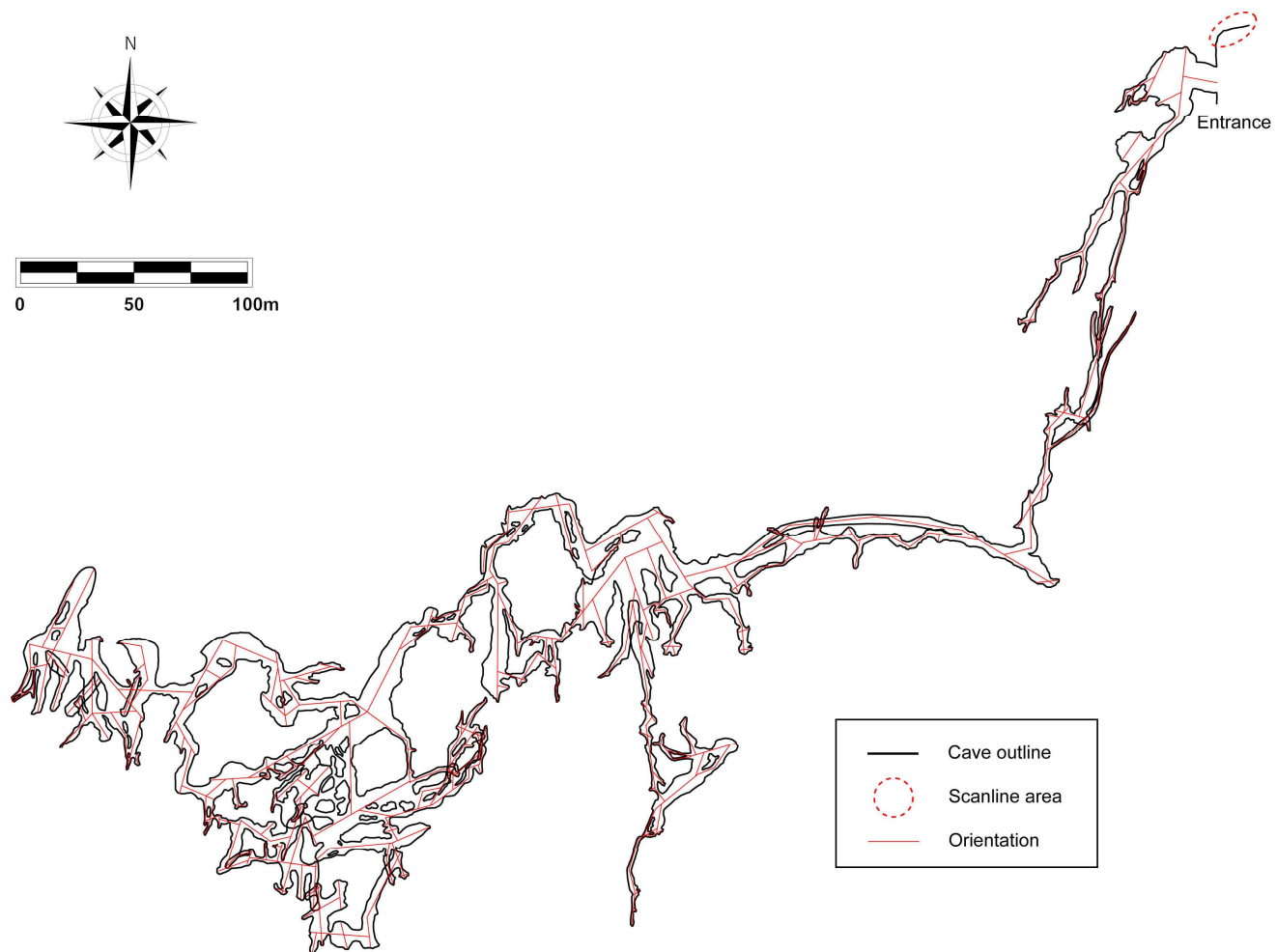


Fig. 3.2.6. Orientation in Gossigul Cave(based on Kim[2011])

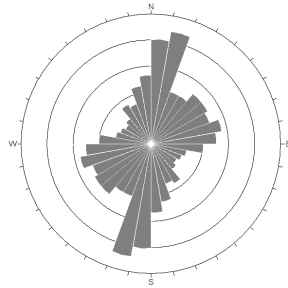


Fig. 3.2.7. Orientation analysis in Gossigul Cave.

연장성 해석을 위해 전체 폭의 평균을 산출한 결과, 약 3.08m인 것으로 분석되었다. 이를 기준으로 할 때, 전체 방향성 중 303개가 평균 폭보다는 연장성이 큰 것으로 해석되었다. 평균의 2배를 기준으로 할 경우 244개, 평균의 3배를 기준으로 하면 195개, 5배를 기준으로 하면 98개의 방향성에 가중치가 적용된다(Table 3.2.1).

Table 3.2.1. Weighting for persistence in Gossigul Cave.

		Details			
Total orientation		324			
Average span(m)		3.08			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	303	244	195	98
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	305	279	216	122

각 방향성의 폭에 대한 연장성 비율을 보면 1.5의 경우 46개, 2의 경우 42개, 3의 경우 28개, 5의 경우 17개의 방향성이 가중치에 적용된다.

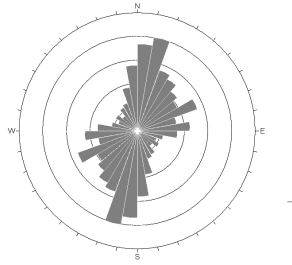
해당 방향성에 연속성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서는 단순 방향성 분포만을 해석한 방향성과 유사한 형태를 보인다. 가장 우세한 방향은 $N0\sim20^{\circ}E$ 이며, 부수적으로 나타나는 방향성은 방향성 분석과 유사한 $N80\sim90^{\circ}E$ 외에 $N0\sim10^{\circ}W$, $N20\sim40^{\circ}E$, $N40\sim70^{\circ}E$ 등도 주요 방향성으로 해석되었다(Fig. 3.2.8, Fig. 3.2.9).

또한 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 해석에 따라 이차적으로 우세한 방향성이 다소 차이를 보인다. Fig. 3.2.8에서 보는 바와 같이 평균 폭 비율법을 적용한 경우 $N0\sim20^{\circ}E$ 외에 $N0\sim10^{\circ}W$, $N20\sim40^{\circ}E$, $N60\sim70^{\circ}E$ 등이 우세하게 나타나고 있다.

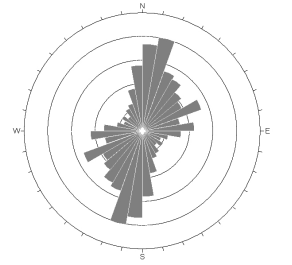
개별 발달 비율법의 경우 $N0\sim10^{\circ}W$ 과 $N40\sim50^{\circ}E$ 이 이차적으로 우세하게 분석되었다.

이러한 방향성의 특징은 김련(2003)에 의해 $N0\sim74^{\circ}E$ 의 방향성이 나타나며 $N30\sim44^{\circ}E$ 방향이 매우 우수하게 발달하고 있다고 한 동굴 내 방향성 해석과는 다소 차이를 보이고 있다. 본 연구의 해석에서 나타난 우세한 방향성은 $N0\sim20^{\circ}E$ 로 판단되며 부수적인 방향성에서는 유사한 패턴을 보이게 분석된 것으로 여겨진다.

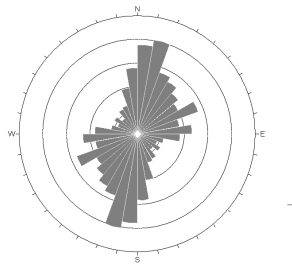
이것은 광역 선구조 분석 결과와도 일치하는 것으로 $N0\sim20^{\circ}E$ 이 동굴 형성에 영향을 미치는 방향성을 지시하는 것으로 해석되며, 고씨동굴의 경우 광역 선구조의 영향이 매우 큰 지역으로 판단된다.



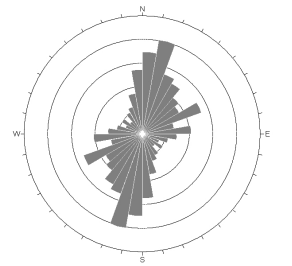
(a) including below criteria(1)



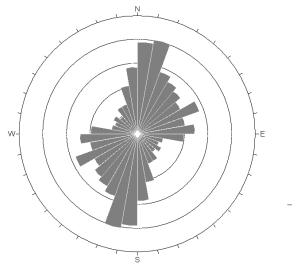
(b) excluding below criteria(1)



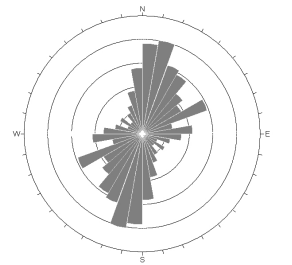
(c) including below criteria(2)



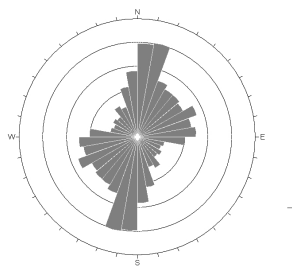
(d) excluding below criteria(2)



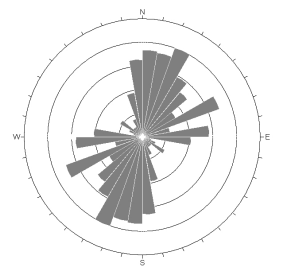
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



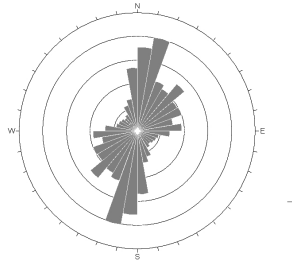
(g) including below criteria(5)



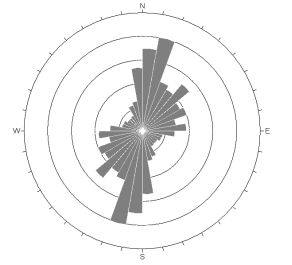
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.2.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Gosssigul Cave.

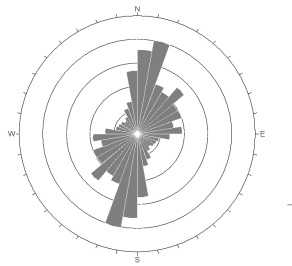
* Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio



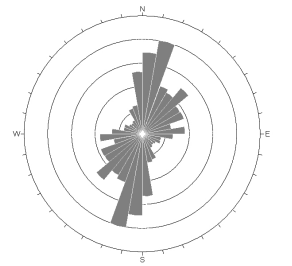
(a) including below criteria(1.5)



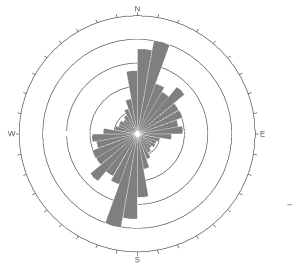
(b) excluding below criteria(1.5)



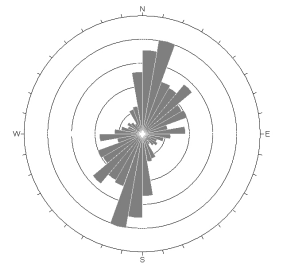
(c) including below criteria(2)



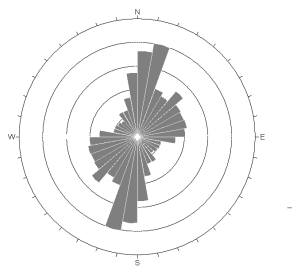
(d) excluding below criteria(2)



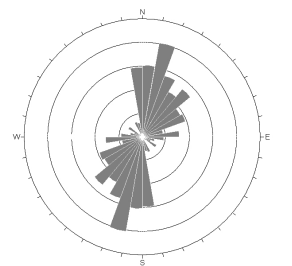
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.2.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Gossigul Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

3.2.5. 불연속면 특성 분석

고씨동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 고씨동굴 입구의 상부 노두와 입구 우측에 노출된 암사면에 대해 조사를 수행하였다 (Fig. 3.2.10).



(a) Upper slope



(b) Right slope

Fig. 3.2.10. Gossigul Cave Entrance.

고씨동굴 입구의 약 15m 상부 등산로 주변에 노출된 노두의 경우 자연사면 상태로 표면의 약한 풍화가 관찰되고 있으며 일부 이끼와 실트질 모래로 불연속면의 틈새가 충전된 상태이다. 암석의 색은 담회색에서 암회색의 특징을 보이고 있으며 지오향머(Geo-hammer)로 타격시 약한 반

발과 암편의 부스러짐이 관찰된다(Fig. 3.2.10 (a)).

고씨동굴 입구 우측에 위치한 암사면의 경우 고씨동굴 입구 정비를 위해 일부 인공적인 절취가 있었던 지역으로 암의 풍화는 잘 관찰되지 않고 있으며 일부 층리면을 따라 암석의 스펀지워크 현상이 일부 관찰되고 있다. 불연속면의 틈새는 일부 열려진 상태를 보이기도 하며 실트질 모래로 충전된 상태를 보이기도 한다(Fig. 3.2.10 (b)).

3.2.5.1. 고씨동굴 입구 상부

해당 암사면의 조사구간은 약 2m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 25개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 주로 단일 방향성이 우세하게 관찰되고 있으며 일부 다른 방향성을 보이는 불연속면이 관찰되고 있다. 주 불연속면의 방향성은 N58°E/44°NW으로 주 층리방향만이 관찰되는 특성을 보이고 있다(Table 3.2.2).

불연속면의 간격은 매우 조밀한 정도(very close spacing)를, 연속성은 보통의 정도(medium persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

3.2.5.2. 고씨동굴 입구 우측

동굴 입구 우측 관리사무실 뒤편의 암사면의 조사구간은 약 5.5m 정도이며, 확인된 불연속면의 수는 총 29개다.

동굴 상부에서 확인된 노두와는 달리 풍화의 진행은 상대적으로 더딘 것으로 확인되고 있으며 다양한 불연속면의 패턴이 관찰되고 있으며 입구 상부에서 확인된 불연속면의 방향성이 본 조사지점에서도 모두 확인

되고 있다.

불연속면의 주 방향성(set 1)은 N5°E/66°SE으로 확인되었으며, 부수적으로 N51°E/76°SE, N62°E/68°NW, N29°W/74°NE, N52°W/73°SW 등의 방향성이 분포하는 것으로 분석되었다(Table 3.2.3).

동굴 상부의 주 방향성과는 다소 상이한 방향성이 우세하게 나타나고 있는데 이 방향성은 광역 선구조의 방향성(N0~30°E)과 동굴의 진행 방향성(N0~20°E)에서 확인된 것과 유사하다. 이러한 특성은 동굴의 형성 시 층리의 영향뿐만 아니라 지구조적 영향(단층, 습곡 등)이 우세하게 동굴형성에 영향을 미쳐서 나타나는 특성을 판단된다.

불연속면의 간격은 매우 조밀에서 보통 정도(very close~moderate spacing)로 불연속면의 군집특성에 따라 다른 간격 특성을 보이고 있으며, 연속성은 낮은 정도(low persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 주로 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태인 것으로 분석되었다.

Table 3.2.2. Discontinuities of Upper slope of Gossigul Cave Entrance.

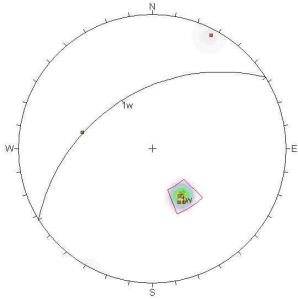
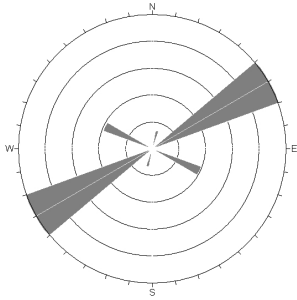
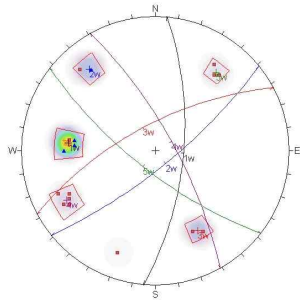
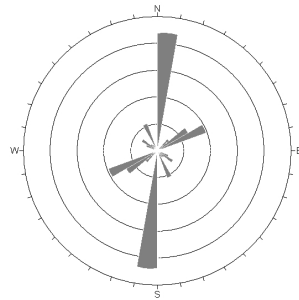
		Details	
Scanline length		2.0m	Trend/plunge
Number of Discontinuities		310/00	
Stereonet		25	
			
Set		Set 1 (bedding)	Set 2
		N58°E	—
		44°NW	—
Spacing (cm)	Mean	5.58	—
	S.D.	4.86	—
Persistence (m)	Mean	4.24	—
	S.D.	0.71	—
Roughness (0~20)	Mean	4.26	—
	S.D.	0.45	—
Aperture (mm)	Mean	1.65	—
	S.D.	0.49	—
Infilling		mainly silty sand, partially open	
Seepage		mainly wet, partially dry	
Strength (MPa)		36.88	—

Table 3.2.3. Discontinuities of Right slope of Gossigul Cave Entrance.

		Details					
Scanline length		5.5m		Trend/plunge		075/00	
Number of Discontinuities		29					
Stereonet							
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)	Set 4 (joint)	Set 5 (joint)	
		N5°E	N51°E	N62°E	N29°W	N52°W	
		66°SE	76°SE	68°NW	74°NE	73°SW	
Spacing (cm)	Mean	20.20	5.34	9.14	69.82	26.15	
	S.D.	17.64	2.01	–	63.40	16.81	
Persistence (m)	Mean	2.30	2.17	2.25	2.40	2.67	
	S.D.	0.46	0.29	0.35	0.55	0.58	
Roughness (0~20)	Mean	4.00	2.67	2.00	3.20	2.67	
	S.D.	1.20	1.15	–	1.64	1.15	
Aperture (mm)	Mean	1.87	1.00	2.00	1.30	1.00	
	S.D.	0.83	0.00	–	0.45	0.00	
Infilling		mainly silty sand, partially open					
Seepage		mainly wet, partially dry					
Strength (MPa)		36.48	17.71	–	–	–	

3.3. 노동동굴

3.3.1. 현장 개요

노동동굴은 충북 단양군 대강면 노동리에 위치한 자연 석회동굴로 소백산맥 제2연화봉(1,357m) 줄기의 북석측에 위치한 원줄봉(200m) 북서측에 위치하고 있다. 노동동굴이 위치한 원줄봉 남측에 노동천이 흐르고 있으며 하천은 서쪽으로 흘러 남한강으로 합류하는 형태를 보이고 있다 (Fig. 3.3.1).

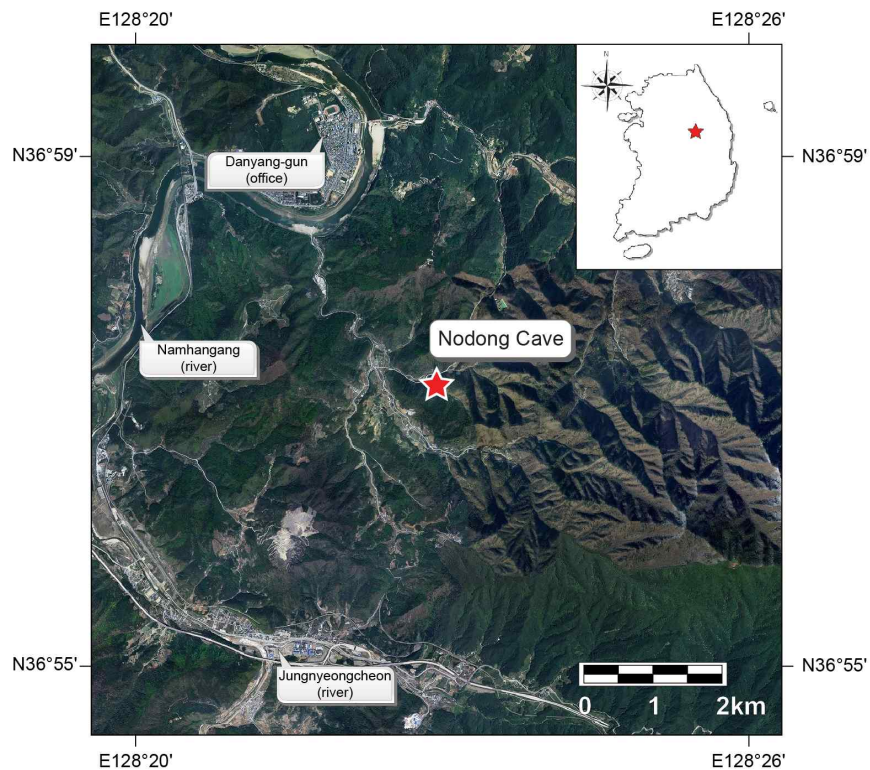


Fig. 3.3.1. Location map of Nodong Cave(based on Website map.naver.com).

1979년 6월 우리나라 천연기념물 제 262호로 지정되었으며 지금 현재는 동굴 개방으로 인한 동굴 내 석회동굴 2차생성물의 소실과 훼손, 외부 공기 유입에 따른 변질, 안전상의 문제 등으로 2008년 1월부터 폐쇄된 상태다.

3.3.2. 광역 선구조

노동동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.3.2.).

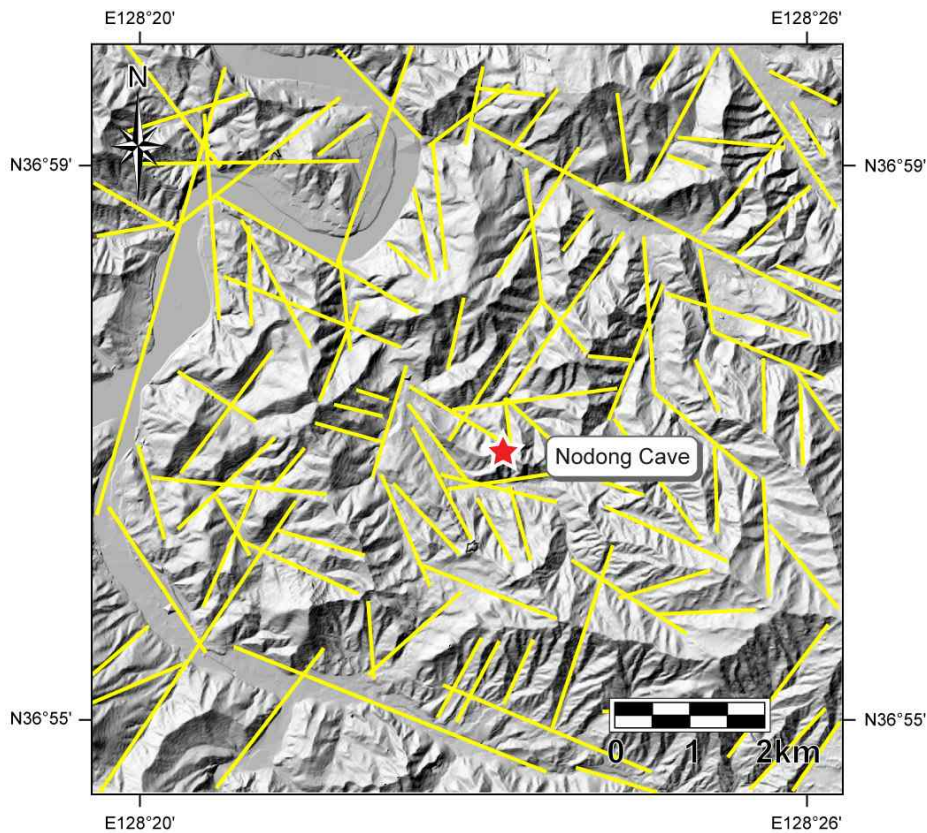


Fig. 3.3.2. Lineaments around Nodong Cave.

노동동굴 주변 광역 선구조는 총 108개가 추출되었다. 이를 바탕으로

선구조의 방향성을 분석한 결과, $N0\sim10^{\circ}W$ 이 가장 우세한 방향인 것으로 분석되었으며, $N30\sim40^{\circ}E$ 과 $N60\sim80^{\circ}W$ 의 방향성이 부수적으로 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 3.3.3).

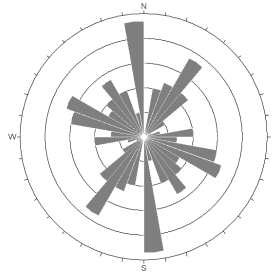


Fig. 3.3.3. Orientation analysis of lineaments around Nodong Cave.

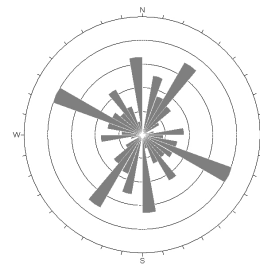
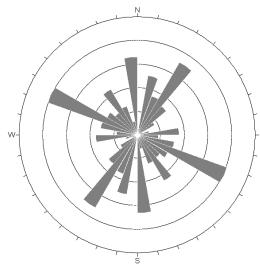
방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 경우에는 $N60\sim70^{\circ}W$ 의 방향성이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, 부수적으로 $N0\sim10^{\circ}W$ 과 $N30\sim40^{\circ}E$ 이 나타나고 있다. 또한, 2km 이상이 되는 기준에서는 $N10\sim20^{\circ}E$ 의 방향성이 새롭게 두각되어 나타나며, $N60\sim70^{\circ}W$ 는 상대적으로 작아지는 특징을 보이고 있다(Fig. 3.3.4).

단순 방향성 해석과 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석의 차이가 발생하는 것은 연장성을 충분히 갖고 있는 방향성의 비중이 다르기 때문으로 해석되며 두 방향($N60\sim70^{\circ}W$, $N0\sim10^{\circ}W$) 모두 노동동굴 형성에 영향을 주었을 것으로 판단되며, 부수적으로 계속 나타나는 $N30\sim40^{\circ}E$ 의 영향도 있을 것으로 판단된다.

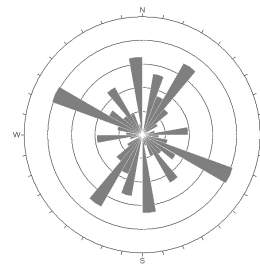
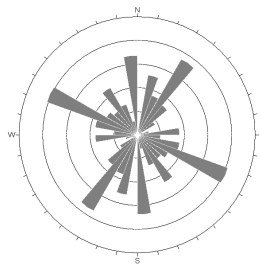
3.3.3. 지질특성

국립지질조사소(1967)에 의하면 하부에서부터 장산규암층, 묘봉층, 고

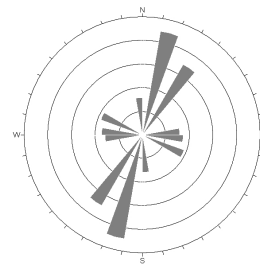
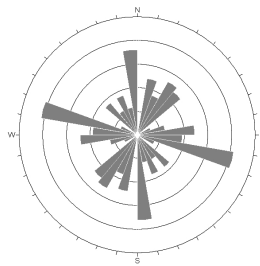
성석회암층, 풍춘석회암층, 청동리층, 두무동층, 막골석회암층, 홍월리층, 삼태산층이 정합적으로 위치하고 있는 것으로 보고하고 있다. 또한 이 위에 정합상태로 홍점통과 사동통, 고방산통이 위치하는 세 지층이 부정합으로 놓여있는 것으로 제시하고 있다(Fig. 3.3.5).



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.3.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Nodong Cave.

* Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)

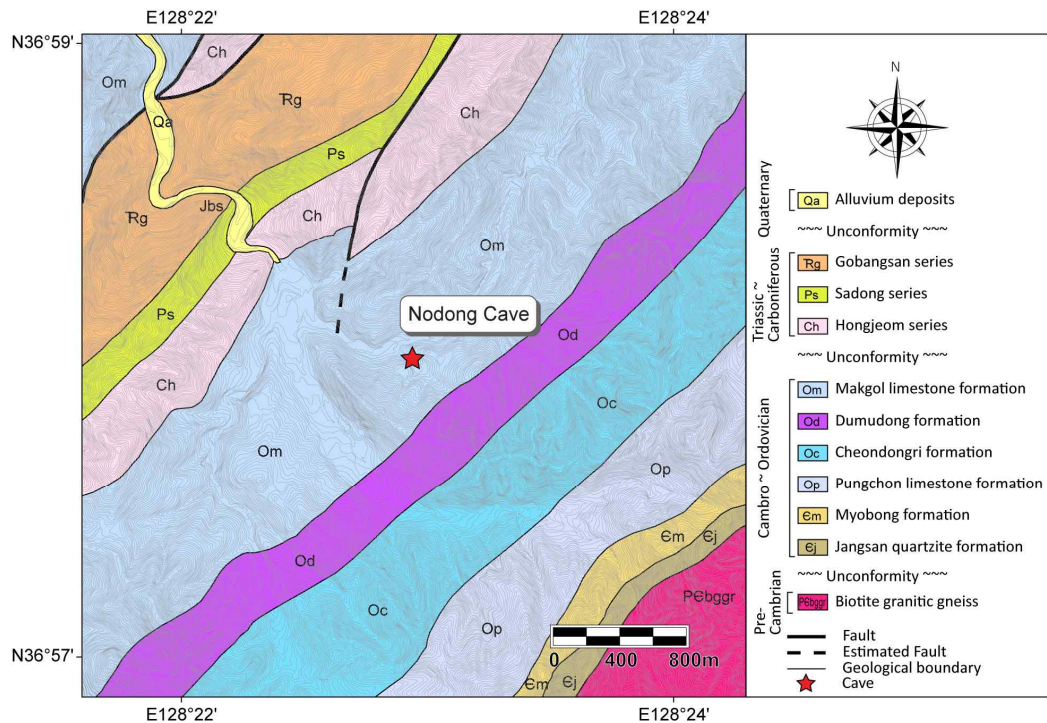


Fig. 3.3.5. Geologic map of Nodong Cave(by Korea Geological Survey[1967]).

노동동굴이 위치한 지역은 막골석회암층으로 북동 방향의 층리를 보이며 분포하며, 이 위에 홍월리층과 삼태산층이 나타나지 않고 부정합관계의 홍점통이 나타나고 있는 것으로 제시하고 있다.

노동동굴 북서측에 N10~30°E의 단층이 일부 위치하고 있고 이 단층은 막골석회암층과 홍점통을 구획하고 있는 것으로 분석하고 있다. 또한 노동동굴 남서측의 죽령천 부근에는 층리방향의 수직되게 단층이 위치하고 있는 것으로 보고하고 있다.

노동동굴이 위치한 막골석회암층은 N40~50°E/60~70°NW의 방향성을 가지고 분포하고 있는 것으로 보고하고 있다.

이러한 특징을 광역 선구조 분석 자료와 함께 해석해 볼 때, 노동동굴이 위치하는 막골석회암층과 상위 홍점통, 하위 두무동층은 전체적으로 N30~40°E의 방향으로 지층경계를 이루고 있는 것으로 해석할 수 있다. N0~10°W 내지 N0~10°E 방향, N60~80°W방향성은 단층 및 습곡과 같은 지구조적 영향성을 주는 방향성으로 해석하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

3.3.4. 동굴특성

경만호 외(1993)에 의하면 내부 조명시설에 따른 2차생성물의 녹색오염과 관람객의 접촉에 의한 흑색오염, 훼손, 종유석의 추가성장에 따른 낙반사고, 동굴 서식생물의 급감 등의 위험성을 제기하고 있다.

국립문화재연구소(2010)에 의하면 노동동굴의 전체규모는 약 800여 m로 개방구간과 미개방구간으로 분리되어 있으며 주로 수직적 발달이 잘 되어 있는 동굴로 보고하고 있다. 또한, 종유폭포, 석순, 종유석, 석주 등 2차 생성물이 잘 발달된 동굴로 지질학적 연구가치가 매우 큰 동굴이다. 이를 바탕으로 1979년 천연기념물로 지정되고 1980년부터 일반인에게 개발되었지만, 동굴훼손이 심각하여 2008년 개방이 폐쇄되었다.

우경식 외(2008)에 의해 작성된 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.3.6). 추출된 방향성은 총 19개로 방향성을 분석하면 Fig. 3.3.7과 같다.

노동동굴 내 방향성만을 분석한 결과 N40~60°E 방향이 매우 우세한 것으로 나타나고 있으며 부수적 방향성은 뚜렷하게 나타나지 않고 N30~40°E 약하게 나타나고 있다.

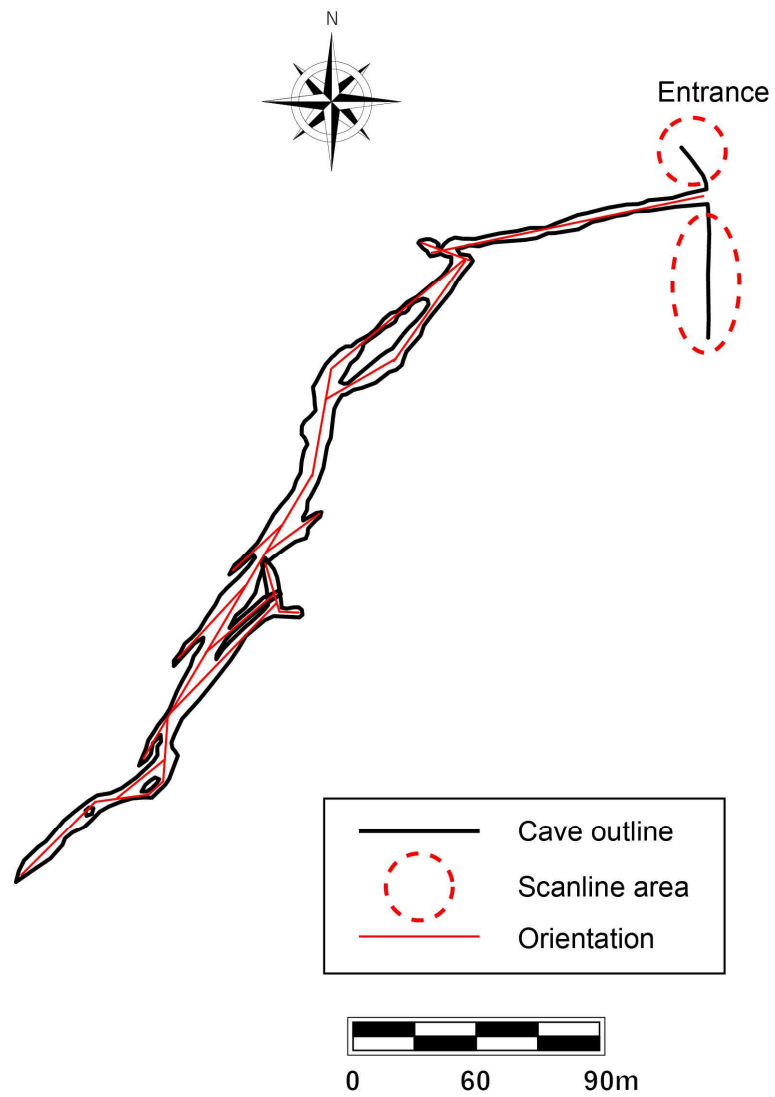


Fig. 3.3.6. Orientation in Nodong Cave(based on Woo *et. al.*[2008]).

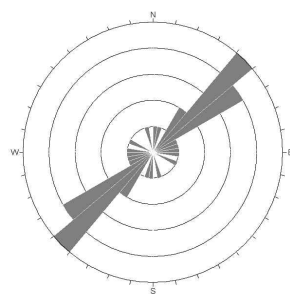


Fig. 3.3.7. Orientation analysis in Nodong Cave.

동굴내 전체 폭의 평균을 산출한 결과, 약 5.97m인 것으로 분석되었다. 이를 기준으로 할 때, 전체 방향성이 평균 폭보다는 연장성이 큰 것으로 해석되었다. 평균의 2배와 3배를 기준으로 하면 17개, 5배를 기준으로 하면 12개의 방향성에 가중치가 적용된다(Table 3.3.1).

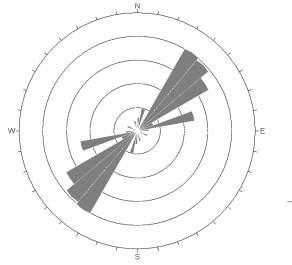
각 방향성의 폭에 대한 연장성 비율을 보면 전체적으로 1.5를 넘고 있는 것으로 분석되었으며, 비율이 2 이상인 것은 18개, 3 이상인 것은 17개, 5 이상인 것은 13개로 방향성 가중치 대상이다.

Table 3.3.1. Weighting for persistence in Nodong Cave.

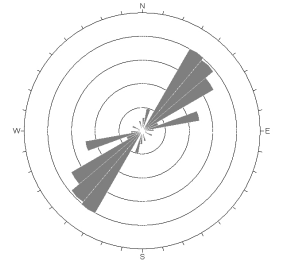
		Details			
Total orientation		19			
Average span(m)		5.97			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	19	17	17	12
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	19	18	17	13

방향성에 연속성을 이용해 가중치를 적용한 결과에서는 해석 기준에 따라 다소 상이한 형태를 보이고 있다(Fig. 3.3.8, Fig. 3.3.9).

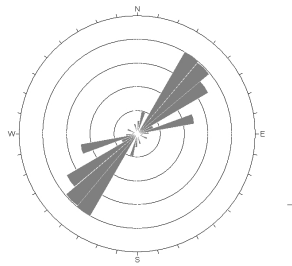
평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 수행할 경우 방향성 분석에서 미약하게 나타난 N30~40°E의 방향성이 매우 우세하며 이차적으로 N40~60°E과 N70~80°E 방향성이 나타나고 있다(Fig. 3.3.8).



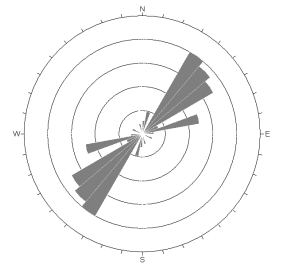
(a) including below criteria(1)



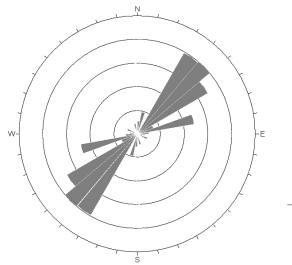
(b) excluding below criteria(1)



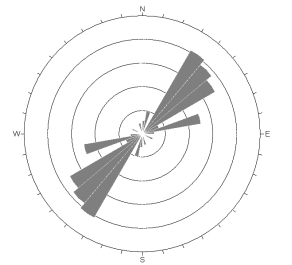
(c) including below criteria(2)



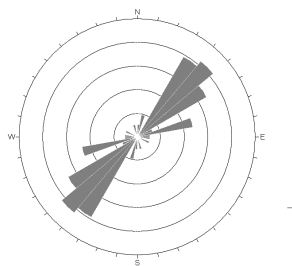
(d) excluding below criteria(2)



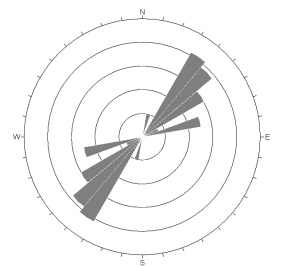
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



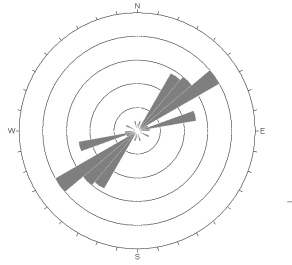
(g) including below criteria(5)



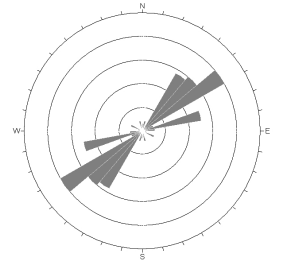
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.3.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Nodong Cave.

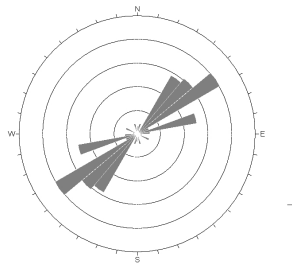
* Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio



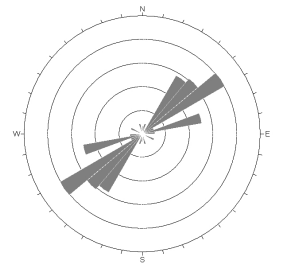
(a) including below criteria(1.5)



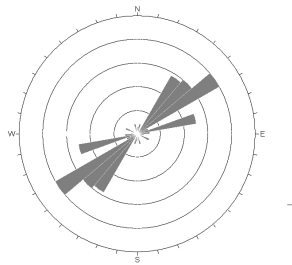
(b) excluding below criteria(1.5)



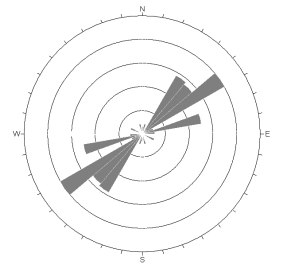
(c) including below criteria(2)



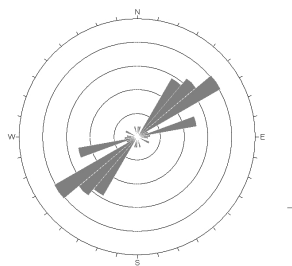
(d) excluding below criteria(2)



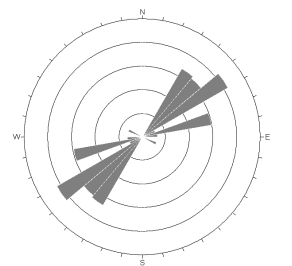
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.3.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Nodong Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

이와 다르게 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 해석에 따르면, 방향성 분석과 유사하게 N50~60°E의 방향성이 우세하며 이차적으로 N30~50°E, N70~80°E 방향성이 나타나고 있다(Fig. 3.3.9).

전체적으로 N30~60°E의 방향성이 노동동굴의 발달에 영향을 미치고 있는 것으로 해석된다. 광역 선구조 및 지질분석에서 나타난 방향성과 연계하여 해석해 보면, N30~50°E 방향이 노동동굴 발달시 주로 영향을 미친 방향성으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.5. 불연속면 특성 분석

노동동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 노동동굴 입구의 좌측과 우측에 노출된 암사면에 대해 조사를 수행하였다(Fig. 3.3.10).

노동동굴 입구 주변은 동굴 진입 폐쇄로 인해 방치된 상태이다.

좌측 암사면과 우측 암사면 모두 담갈색~암갈색의 테라로사(terra rossa)를 포함하는 실트질 모래가 표토층에 일부 포함되고 있으며, 불연속면의 틈새에도 충전된 상태이다.

특이할 점은 좌측 암사면과 우측 암사면의 불연속면의 경사방향이 차이나는 형태를 보이고 있음을 육안으로도 확인할 수 있는 상태이다.

좌·우측면의 노두에 지오햄머로 타격시 좌측면에서의 반발력이 더 강한 것을 확인할 수 있으며 풍화정도를 판단할 때 좌측사면은 보통 풍화(Moderately weathered)정도를 보이며, 우측사면은 심한 풍화(Highly weathered)로 좀 더 진행된 것으로 판단된다.



(a) Left slope



(b) Right slope

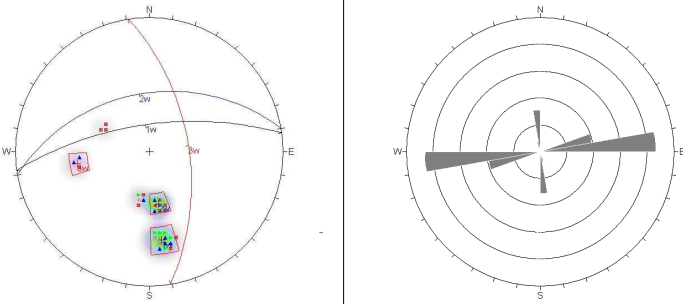
Fig. 3.3.10. Nodong Cave Entrance.

3.3.5.1. 노동동굴 입구 좌측사면

해당 암사면의 조사구간은 약 15.5m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 96개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 $N82^{\circ}E/67^{\circ}NW$ 과 $N80^{\circ}E/43^{\circ}NW$ 의 방향성이 주로 발달된 것으로 분석되었다. 부수적으로 $N9^{\circ}W/57^{\circ}NE$ 의 방향성이 나타나고 있다(Table 3.3.2).

Table 3.3.2. Discontinuities of Left slope of Nodong Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		15.5m	Trend/plunge	000/00
Number of Discontinuities		96		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (bedding)	Set 3 (joint)
		N82°E	N80°E	N9°W
		67°NW	43°NW	57°NE
Spacing (cm)	Mean	24.18	4.98	15.09
	S.D.	28.67	1.20	1.22
Persistence (m)	Mean	4.16	6.09	5.60
	S.D.	0.71	1.25	0.55
Roughness (0~20)	Mean	4.47	3.44	3.20
	S.D.	0.97	1.48	1.10
Aperture (mm)	Mean	1.36	1.64	0.60
	S.D.	0.80	0.92	0.55
Infilling		mainly silty sand, partially open		
Seepage		mainly wet, partially dry		
Strength (MPa)		19.59	17.71	–

특이할 점은 사면 중 입구에서 먼 쪽에서 가까운 쪽으로 일정 구간이 지나면서 경사각이 커지는 특징을 확인할 수 있었다. 조사 당시, 눈과 지표 퇴적물이 다량 분포되어 정확한 원인을 찾지는 못했지만, 단층 및 습곡의 영향 구간으로 추정된다.

불연속면의 간격은 군별로 각기 다른 패턴을 보이며 매우 조밀한 정도(very close spacing)에서 보통 정도(moderate spacing)인 특성을 보인다. 연속성은 보통의 정도(medium persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

3.3.5.2. 노동동굴 입구 우측

동굴 입구 우측 매표소 뒤편의 암사면의 조사구간은 약 6m 정도이며, 확인된 불연속면의 수는 총 66개다.

동굴 입구 좌측사면에서 확인된 노두의 방향성과는 다소 상이한 방향성 패턴을 보인다.

불연속면의 주 방향성(set 1)은 $N45^{\circ}E/62^{\circ}NW$ 으로 확인되었으며, 부수적으로 $N75^{\circ}W/62^{\circ}SW$, $N26^{\circ}W/61^{\circ}SW$ 등의 방향성이 분포하는 것으로 분석되었다(Table 3.3.3).

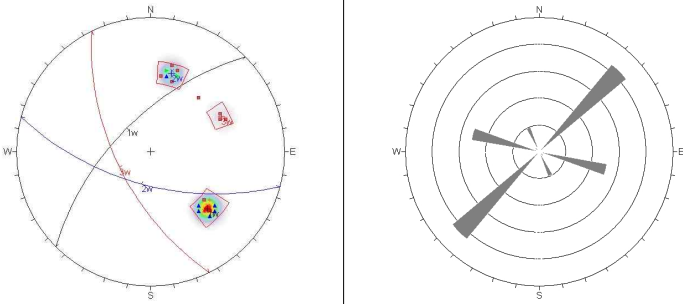
불연속면의 주 방향성의 주향은 광역 선구조 분석과 기존 지질도 분석에서 확인된 방향성과 매우 일치하는 방향성으로 해당 사면 내 주요 층리군으로 확인된 방향성이다. 하지만 이러한 방향성의 분포가 좌측 사면에서는 잘 관찰되지 않고 약 $N80^{\circ}E$ 의 주향을 보이는 방향성이 우세하게 나타나는 것으로 보아 좌측사면과 우측사면사이에 지구조적 패턴을 보이는 경계가 위치하고 있는 것으로 추정할 수 있다. 이러한 추정은 노동동

굴의 초기 발달은 단층과 같은 구조적 경계를 중심으로 동굴의 형성이 시작되었던 것으로 판단할 수 있다. 이 후 구조적 경계를 시작으로 수직적 공동형성이 주로 층리면 방향으로 석회동굴 발달이 진행된 것으로 추정된다.

불연속면의 간격은 매우 조밀에서 조밀 정도(very close~close spacing)의 특성을 보이고 있으며, 연속성은 낮은 정도(low persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 평면형(planar), 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태인 것으로 분석되었다.

Table 3.3.3. Discontinuities of Right slope of Nodong Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		6.0m	Trend/plunge	160/00
Number of Discontinuities		66		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)
		N45°E	N75°W	N26°W
		62°NW	62°SW	61°SW
Spacing (cm)	Mean	7.98	5.24	17.16
	S.D.	2.47	0.55	15.69
Persistence (m)	Mean	2.20	2.73	1.83
	S.D.	0.25	0.53	0.29
Roughness (0~20)	Mean	3.58	3.64	4.67
	S.D.	1.11	0.79	1.15
Aperture (mm)	Mean	1.45	1.64	1.33
	S.D.	0.50	0.49	0.58
Infilling		mainly silty sand, partially open		
Seepage		mainly wet		
Strength (MPa)		17.55	–	–

3.4. 백룡동굴

3.4.1. 현장 개요

백룡동굴은 강원도 평창군 미탄면 마하리에 위치하고 있으며, 동강에 인접하여 발달된 자연 석회동굴이다. 평창 백운산(883m)의 남서측 산기슭에 위치하며, 해발고도는 235m로 동강 수면의 약 10~15m 지점에 있다(Fig. 3.4.1).

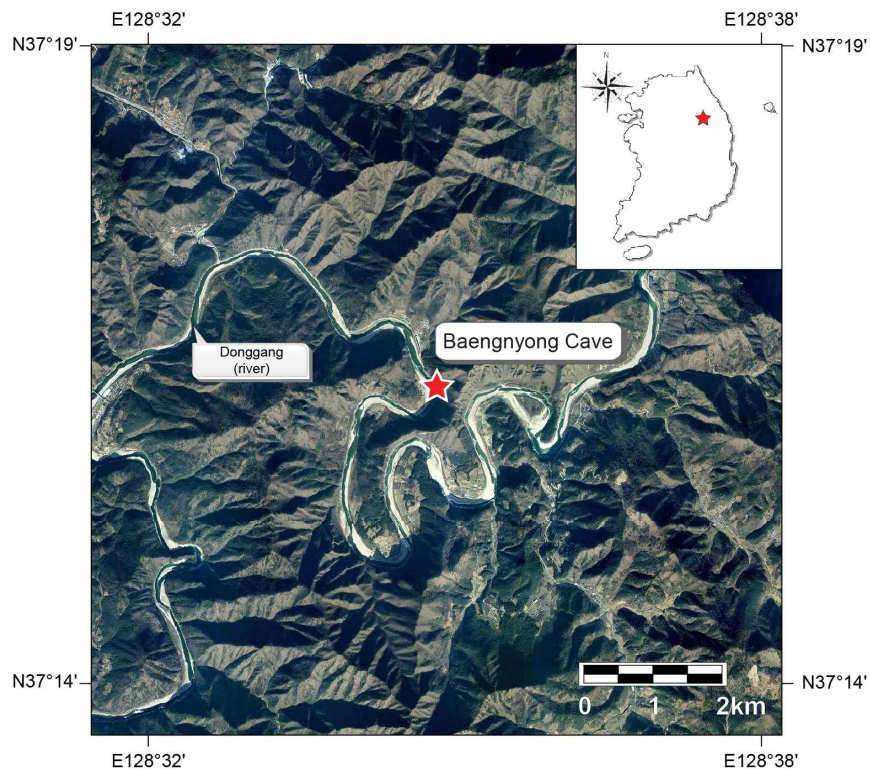


Fig. 3.4.1. Location map of Baengnyong Cave(based on Website map.naver.com).

1976년 주민에 의해 처음 알려진 동굴로 1979년 2월 천연기념물 260

호로 지정되었다. 동굴의 자연상태를 최대한 보호하고자 내부의 조명시설을 설치하지 않고 인공구조물 설치도 최소화한 상태에서 자연생태학습장의 목적으로 일반인에게 2010년부터 개방되기 시작했다.

3.4.2. 광역 선구조

백룡동굴의 주변의 광역 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.4.2).

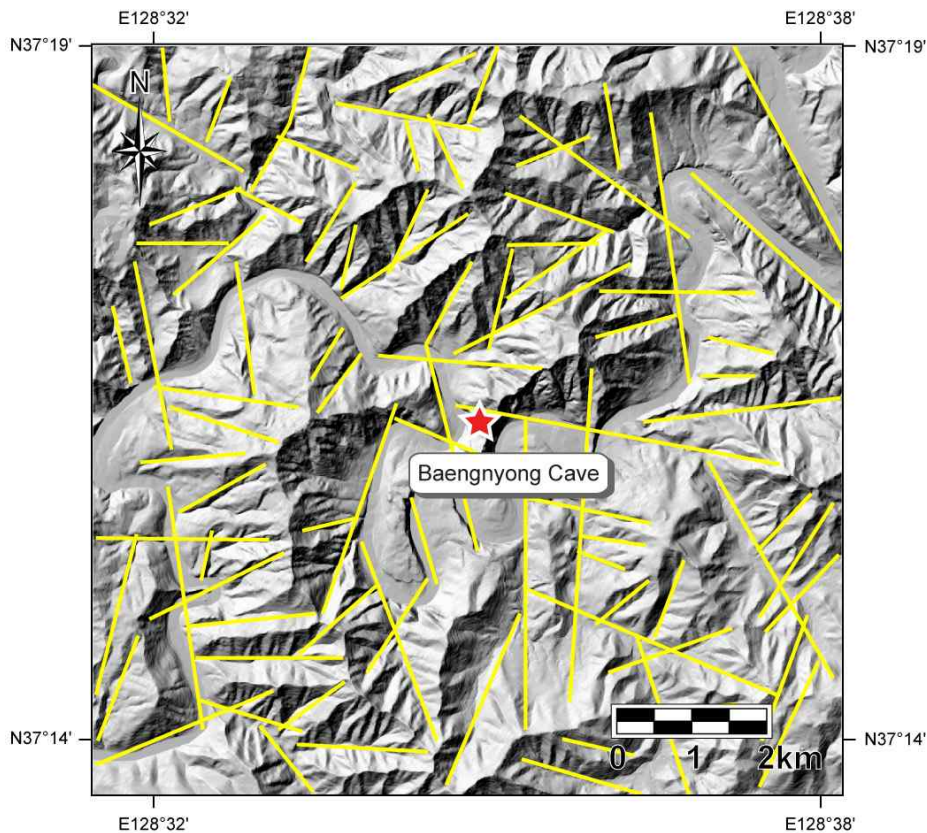


Fig. 3.4.2. Lineaments around Baengnyong Cave.

노동동굴 주변 광역 선구조는 총 88개가 추출되었다. 선구조의 방향성만을 이용하여 분석한 결과, N70~90°W이 가장 우세한 방향인 것으로

분석되었으며, N20~30°E과 N60~70°E의 방향성이 부수적으로 나타나고 있다(Fig. 3.4.3).

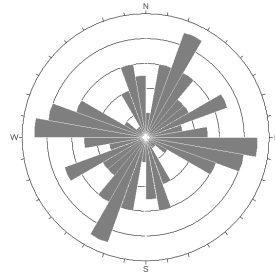


Fig. 3.4.3. Orientation analysis of lineaments around Baengnyong Cave.

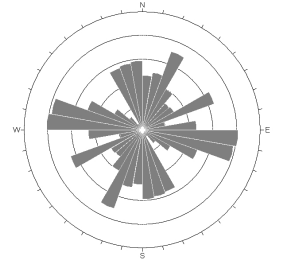
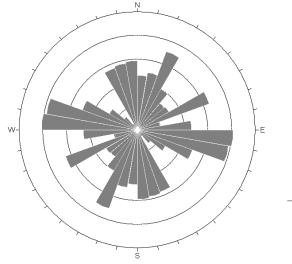
방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 유사한 방향성 패턴을 보이고 있다. N70~90°W와 함께 N20~30°E과 N60~70°E가 우세하게 분포하는 것으로 해석되었다(Fig. 3.4.4).

단순 방향성분석과 연장성을 이용해 가중치를 적용한 분석에서 나타난 세 방향성(N70~90°W, N20~30°E, N60~70°E)이 백룡동굴 형성에 주된 영향을 미친 방향성으로 판단된다.

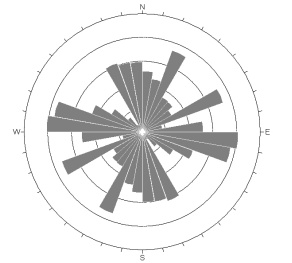
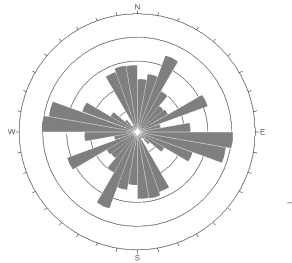
3.4.3. 지질특성

국립지질조사소(1966)와 서무송(1978), 강원대학교자원개발연구소(1989)의 연구에 의하면 백룡동굴이 위치한 지역을 조선누층군의 막골석회암층으로 설명하고 있다. 막골석회암층 상부에 부정합상태로 반송층이 위치하고 있으며 백룡동굴 북서측에서 나타나는 정선석회암층과는 층상단층의 관계를 보이는 것으로 해석하고 있다. 남동측에서는 정선석회암층이 나타나지 않고 시대미상의 고성석회암층과 고성세일층이 부정합적

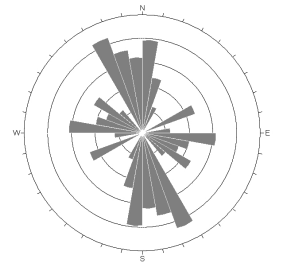
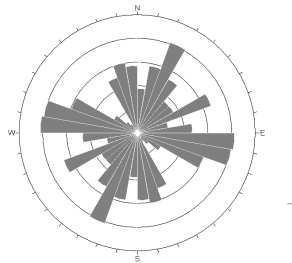
으로 위치하며 충상단층에 의해 일부 구획되고 있음을 설명하고 있다 (Fig. 3.4.5).



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.4.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Baengnyong Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

있다.

기존 연구내용을 바탕으로 재해석해 보면 백룡동굴 주변은 다양한 퇴적구조를 보이는 막골석회암층이며, 북동-남서방향의 충상단층의 영향으로 막골층 내에 균열 집중구간이 발생하였을 것으로 추정된다. 이런 영향으로 수평발달이 우세한 석회동굴로 진행되었을 것으로 예상할 수 있으며 백룡동굴의 해발고도와 동강의 지하수위의 고도차이가 작은 것으로 보아 수직적 발달 변화는 미약할 것으로 추정할 수 있다.

3.4.4. 동굴특성

서무송(1978)에 의하면 백룡동굴의 형성은 약 3만년 전부터 지하수준면이하에 있으면서 서서히 지하수위의 하강으로 인해 지하수준면 위로 공동이 노출되면서 지속적으로 발달해 온 것으로 보고 있다.

강원대학교자원개발연구소(1989)에 의하면 백룡동굴의 총 길이는 1,123m이며, 부분적으로 경사굴의 특징을 보이는 구간도 있기는 하지만 전체적으로 수평굴 발달양상을 보이는 것으로 보고하고 있다. 또한 일부 수로굴을 제외한 모든 동굴은 거의 수평적으로 연결된 것으로 보고하고 있다.

국립문화재연구소(2010)의 연구에 의하면 주로 수평굴의 형태를 띠고 있으며 일부 수직구간을 포함하고 있다. 현재 지하수면이 주변 동강의 하식작용에 의해 내려감으로써 수로를 따라 하층 구간이 활발히 생성되고 있는 것으로 보고하고 있다. 동굴의 형상은 주로 경사진 타원형의 형태가 우세하고 주 절리면을 따라 지하수면 근처에서 형성된 후 동굴 내를 흐르는 동굴류(洞窟流에) 의해 확장된 것으로 해석하고 있다.

김련(2011)의 연구에 의하면, 백룡동굴의 주굴은 동-서로 발달한 절리면을 따라 발달하고 있다. 입구의 경우 N80°E/70°SE, EW/60°S의 방향성

을 보이는 절리면을 따라 동서방향으로 발달하고, N45°W/수직인 절리면에 의하여 동굴의 폭이 넓어진다고 해석하고 있다. 내부는 N50~80°W/55°SW~수직, N60~80°E/수직, EW/수직, NS/70°E 등의 절리면을 따라 주굴이 발달하며 하고 있다고 보고하고 있다. 동굴의 확장은 N60~80°E/20°NW의 층리면을 따라 이루어진 것으로 보고 있다.

김련(2011)에 의해 제시된 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.4.6). 추출된 방향성은 총 143개로 방향성을 분석하였다.

백룡동굴 내 발달 방향성을 분석한 결과 N80~90°W 방향이 매우 우세한 것으로 나타나고 있으며 부수적으로 N80~90°E와 N60~70°E 방향이 분포하는 것으로 해석되었다(Fig. 3.4.7).

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석을 위해 전체 폭의 평균을 산출한 결과, 약 5.97m인 것으로 분석되었으며 각 기준별 가중치 적용 개수는 Table 3.4.1과 같다.

Table 3.4.1. Weighting for persistence in Baengnyong Cave.

		Details			
Total orientation		143			
Average span(m)		3.72			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	132	95	73	42
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	131	122	88	57



Fig. 3.4.6. Orientation in Baengnyong Cave(based on Kim[2011]).

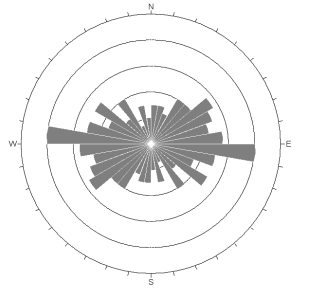


Fig. 3.4.7. Orientation analysis in Baengnyong Cave.

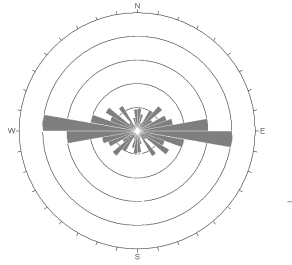
방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석 결과에서는 해석 기준에 따라 다소 상이한 형태를 보이고 있다(Fig. 3.4.8, Fig. 3.4.9).

두 해석 기준 모두 $N80\sim90^{\circ}W$ 의 방향이 우세하게 나타나는 것은 동일하다. 그러나 부수적인 방향성에 있어서 다소 차이를 보인다.

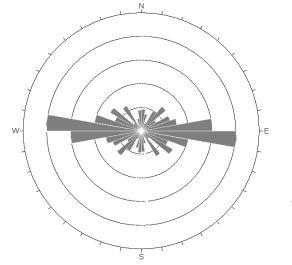
평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용하였을 경우에는 $N80\sim90^{\circ}W$ 과 유사한 $N80\sim90^{\circ}E$ 방향성이 부수적으로 나타나서 동서방향의 발달이 우세함을 표시하고 있다. 그러나, 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 경우, $N80\sim90^{\circ}W$ 를 중심으로 $N50\sim60^{\circ}W$, $N30\sim40^{\circ}W$, $N60\sim70^{\circ}E$ 등이 부수적으로 나타나고 있다.

이러한 차이는 $N50\sim60^{\circ}W$ 과 $N30\sim40^{\circ}W$ 방향성은 폭이 좁고 길게 발달된 특성이 많기 때문에 나타난 차이로 해석된다.

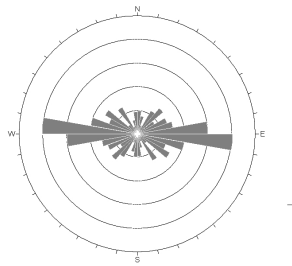
전체적으로 동굴 방향성을 판단해 볼 때, 광역 선구조 분석 중 주요 방향성인 $N70\sim90^{\circ}W$ 과도 일치하고 있다. 그러나 기존 연구에서 제시된 충상단층의 방향성(약 $N40\sim50^{\circ}E$)을 보이는 분포는 잘 나타나지 않고 있다. 이는 백룡동굴의 형성이 주변 동강의 흐름과 밀접한 상태임을 지시하는 것으로 판단되며, 김련(2011)에 의해 제기된 것처럼 충상단층의 방향성은 동굴의 폭을 일부 확장하는 역할만 한 것으로 추정된다.



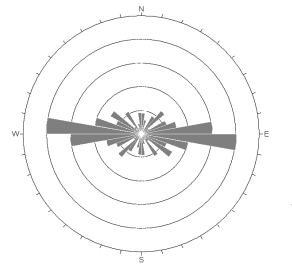
(a) including below criteria(1)



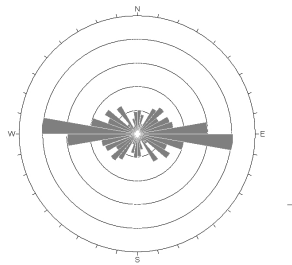
(b) excluding below criteria(1)



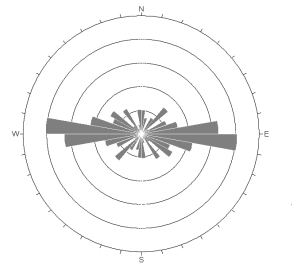
(c) including below criteria(2)



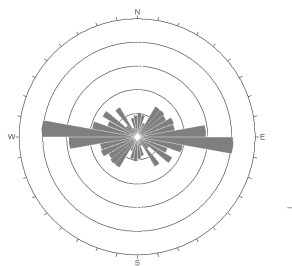
(d) excluding below criteria(2)



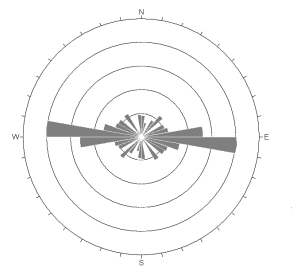
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



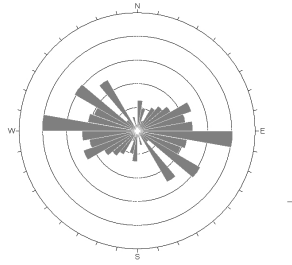
(g) including below criteria(5)



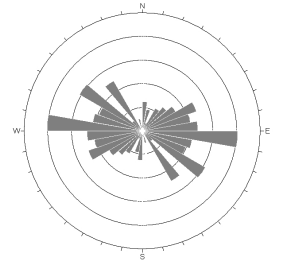
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.4.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Baengnyong Cave.

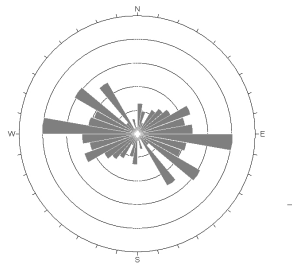
* Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio



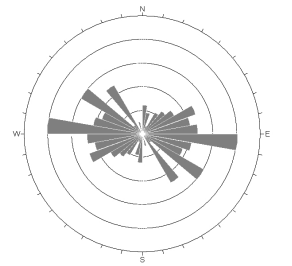
(a) including below criteria(1.5)



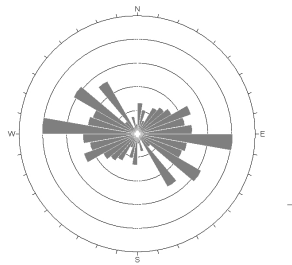
(b) excluding below criteria(1.5)



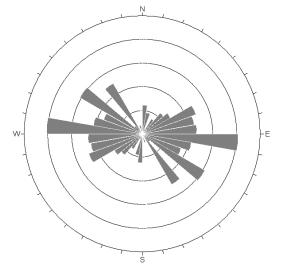
(c) including below criteria(2)



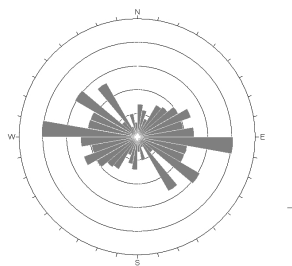
(d) excluding below criteria(2)



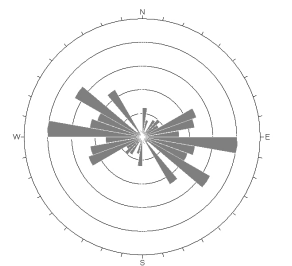
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.4.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Baengnyong Cave.

* Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span

3.4.5. 불연속면 특성 분석

백룡동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 백룡동굴 입구의 우측에 노출된 자연 암사면에 대해 조사를 수행하였다(Fig. 3.4.10).

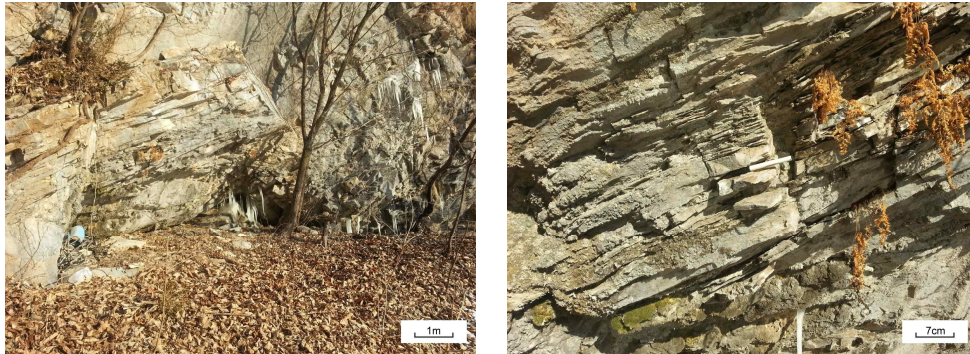


Fig. 3.4.10. Right slope of Baengnyong Cave Entrance.

담회색~암회색의 석회암으로 표면의 변질이 심한 상태이며 층리면을 따라 풍화가 진행된 상태를 보이고 있다. 지표수의 경우 층리면 틈을 따라 흐르다가 동결되어 고드름을 이루고 있다.

층리면을 따라 풍화가 진행된 상태이며, 일부 석회석 용식상태를 확인할 수 있다.

3.4.5.1. 백룡동굴 입구 우측사면

해당 암사면의 조사구간은 약 16m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 185개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 N77°E/28°NW(set 1)과 N86°W/65°SW(set 2)의 방향성이 주로 발달된 것으로 분석되었다. 부수적으로 N15°W/66°SW(set 3)의 방향성이 나타나고 있다(Table 3.4.2). 불연속면의 군

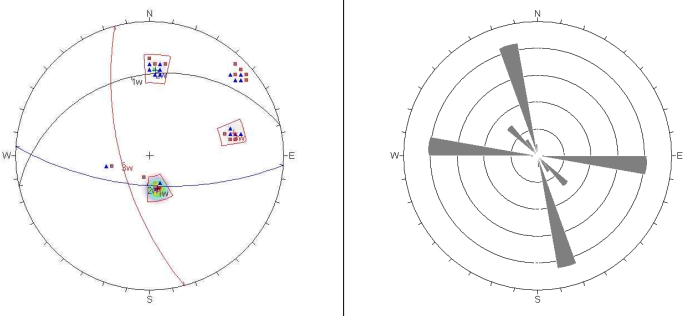
집 중 N77°E/28°NW의 방향성은 해당 사면내 주요 층리 방향이며 이를 set 2와 set 3의 방향성을 가지는 절리가 사교하며 발달하는 특성을 보이고 있다.

층리방향의 동서방향의 형태는 백룡동굴의 발달 방향성과도 매우 유사하며, 선구조에서도 확인되는 방향성이다. 이는 층리의 영향성이 큰 지역이며 일부 단층과 같은 선구조의 영향으로 추가적인 확장의 영향이 있던 것으로 판단할 수 있는 것으로 본다.

불연속면의 간격은 조밀에서 보통 정도(close~moderate spacing)로 불연속면의 군집특성에 따라 다른 간격 특성을 보이고 있으며, 연속성은 보통 정도(moderate persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 주로 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태인 것으로 분석되었다.

Table 3.4.2. Discontinuities of Right slope of Baengnyong Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		16.0m	Trend/plunge	000/00
Number of Discontinuities		185		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)
		N77°E	N86°W	N15°W
		28°NW	65°SW	66°SW
Spacing (cm)	Mean	6.32	22.91	23.62
	S.D.	1.93	3.06	3.06
Persistence (m)	Mean	6.91	3.37	4.91
	S.D.	1.38	1.73	1.04
Roughness (0~20)	Mean	2.52	2.29	2.64
	S.D.	0.76	0.71	0.81
Aperture (mm)	Mean	2.08	1.63	0.82
	S.D.	1.09	0.49	0.40
Infilling		mainly silty sand, partially open		
Seepage		mainly wet or leakage, partially dry		
Strength (MPa)		26.95	28.75	–

3.5. 성류동굴

3.5.1. 현장 개요

성류동굴은 경상북도 울진군 근남면 구산리에 위치한 자연 석회동굴로 선유산 기슭에 위치하고 있다. 동굴 남측의 매화천과 남서측에서 시작한 왕피천이 동굴 서측에 집류하여 북측으로 흐른 후 동편하여 동해로 흐르는 수계 특성을 보이고 있다(Fig. 3.5.1).

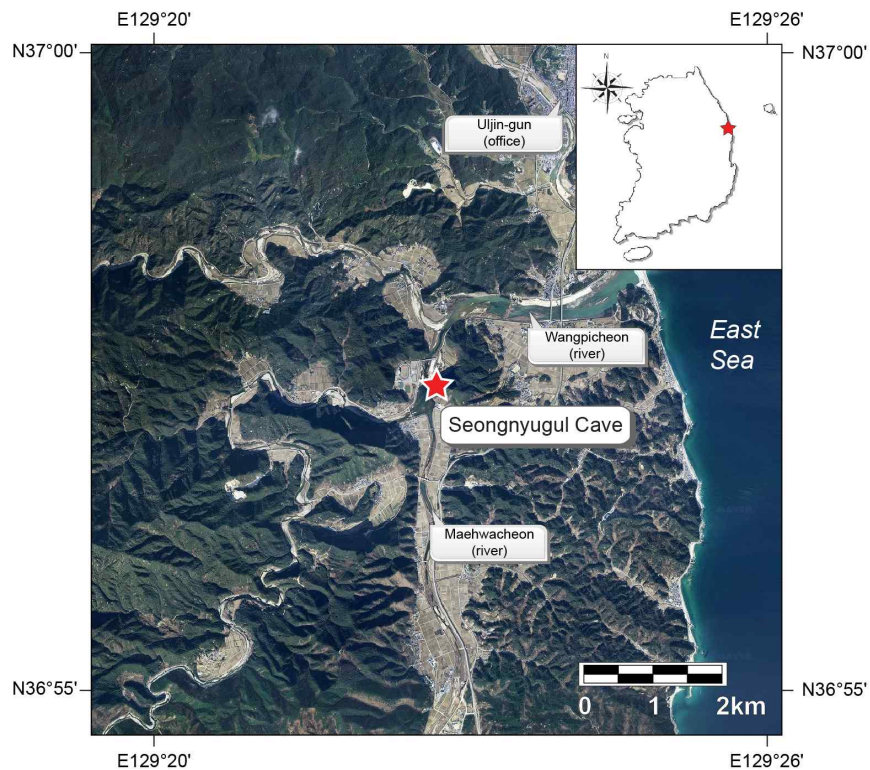


Fig. 3.5.1. Location map of Seongnyugul Cave(based on Website map.naver.com).

1963년 5월 우리나라 천연기념물 제 155호로 지정되었으며 탕천굴, 선

유골로도 불리고 있다. 일반인에게 공개된 후 동굴 내 오염 및 훼손이 심각한 것으로 알려지고 있다.

3.5.2. 광역 선구조

성류동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.5.2.).

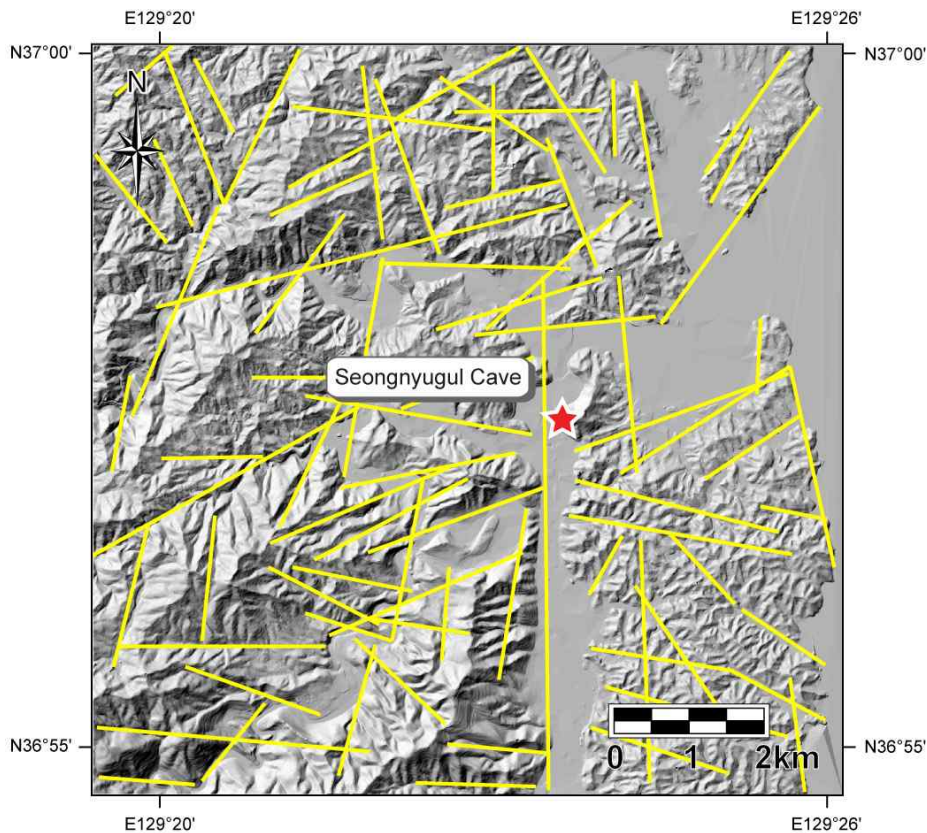


Fig. 3.5.2. Lineaments around Seongnyugul Cave.

성류동굴 주변 광역 선구조는 총 81개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선구조의 방향성을 분석한 결과, N70~90°W 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, N0~10°W와 N60~80°E의 방향성이 부수적으로 나타나고

있다(Fig. 3.5.3).

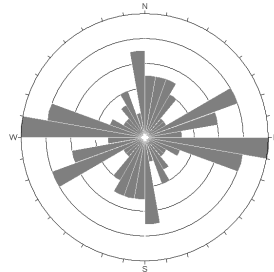


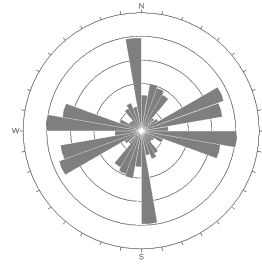
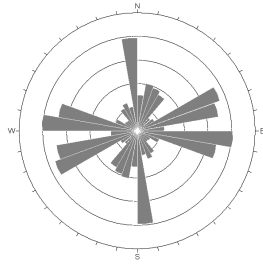
Fig. 3.5.3. Orientation analysis of lineaments around Seongnyugul Cave.

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 유사한 방향성 패턴을 보이고 있다. N70~90°W와 함께 N60~80°E과 N0~10°W가 우세하게 분포하는 것으로 해석되었다(Fig. 3.5.4).

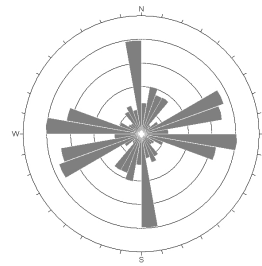
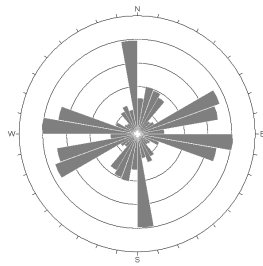
단순 방향성 분석과 방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석 모두에서 나타난 세 방향성이 성류굴 형성에 영향을 미칠 가능성이 큰 방향성들로 분석된다.

3.5.3. 지질특성

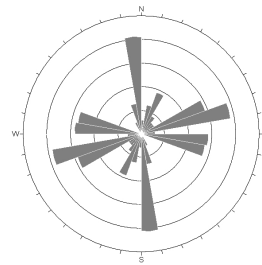
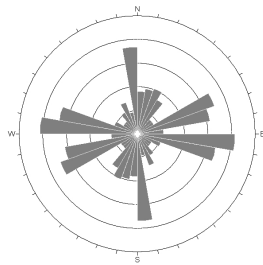
국립지질조사소(1963)에 의하면 성류굴이 위치한 지역은 선캠브리아기의 장군석회암층이 분포하는 것으로 해석하고 있다. 원남통 최상부에 분포하는 장군석회암층은 운모편암(mica schist)와 천매암(phyllite)로 구성된 동수곡층과 정합관계를 이루며 그 상부에 위치한다. 성류굴이 서측 매화천 하부에 남북방향의 단층이 분포하고 있으며 성류굴 입구에서 남측으로 약 1km 이격된 성류굴 교차로 부근에서 일부 동쪽 내지 북동쪽 방향으로 분기되고(splitted) 있는 것으로 해석하였다(Fig. 3.5.5).



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.5.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Seongnyugul Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

서측의 남북방향 단층과 관입에 의해 선캠브리아기의 화강편마암이 매 화천 건너편에 위치하는 특성을 보인다. 북측에서는 동서방향의 단층에 의해, 남측은 북동-남서방향 분기된 단층에 의해 성류굴 남북지역에 동

수곡층이 나타나고 있음을 보고하고 있다. 또한, 성류굴 북동측의 주요 방향성과 성류굴 남측의 주요 방향성이 다르게 나타나는 특성이 있다고 보고하고 있다.

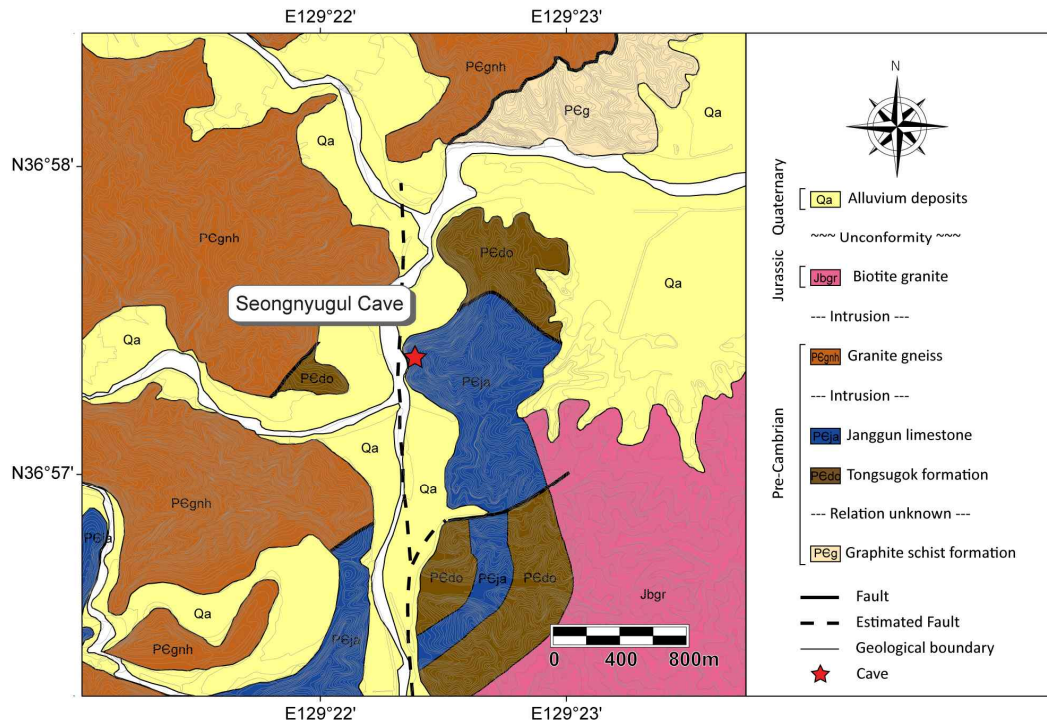


Fig. 3.5.5. Geologic map of Seongnyugul Cave(by Korea Geological Survey[1963]).

김추운 외(1992)에 의하면 해당지층을 장군석회암층으로 해석하고 있으며 부분적으로 동력변질을 받고 있으며 일부 대리석화되어가고 있는 것으로 해석하고 있다.

임병렬 외(2003)에 의하면 장군석회암층은 매산층, 구산리층, 남수산층, 송촌층, 몽천층, 금매리층 등 6개지의 지층으로 분류되며 이는 조선누층군의 묘봉층, 풍촌층, 화절층, 동점층, 두무골층, 막골층에 대비된다고 보

고하고 있다. 또한 성류굴 주변은 지층 변형작용이 3번 이상있는 것으로 해석하며 남북방향 및 북북동-남남서 방향의 습곡 및 층상단층에 의한 변형이 있던 것으로 해석하고 있다.

김련과 우경식(2007)은 성류굴 주변에 조선누층군의 대기층, 화절층, 동점층, 두무골층, 막골층이 분포하며 성류굴은 고생대 오르도비스기의 두무골층인 것으로 해석하고 있다.

김련(2011)은 연구에서 성류굴 주변은 주로 결정질석회암층이며 캄브리아기의 대기층과 오르도비스기의 근남층인 부정합상태로 분포하는 것으로 해석하고 있다. 대기층은 괴상의 석회암으로 이루어져 있으며 층리의 발달은 극히 미약하고 생쇄설 입자가 거의 발견되지 않는다는 특성을 보이는 것으로 해석하고 있다. 근남층은 주로 담회색 내지 암회색의 석회암으로 암석 내에 화석이 거의 발견되지 않고 심한 변성과 변형 작용을 받은 것으로 보고 있다.

최진혁 외(2012)에 의하면 성류굴 좌측의 남북방향의 단층을 매화단층, 남측의 분기된 북동-남서방향의 단층을 제4기 단층운동에 의한 구산단층으로 표현하고 있다.

동굴 주변의 지층은 좀더 정확한 해석을 위해 정확한 지층 정립이 필요할 것으로 판단된다.

3.5.4. 동굴특성

홍시환(1983)과 김원진(1998)의 연구에 의하면 포화수역의 지하수면하에서 형성된 것으로 보고 있으며 그 후 순환수류의 영향을 받은 것으로 해석하고 있다. 지하수면이 낮아지면서 동해안의 지반이 상승하면서 동굴 속에 있던 물은 외부로 배출되고 성류동굴은 지하수면 위에 나타나는 것으로 보고하고 있다. 또한 성류굴은 수평굴이며 왕피천류가 성류굴 바

닥면에 침입된 것으로 해석하고 있으며 단층과 절리에 의해 형성된 동굴로 판단하고 있다.

김련(2011)은 성류굴의 경우 $N40\sim70^{\circ}E$ /수직의 절리면을 따라 주굴이 발달한다고 하였다. 제 1입구의 입구는 $N40^{\circ}E/75^{\circ}NW$, 출구는 $N40^{\circ}E/80^{\circ}SE$ 인 절리면을 따라 전개되며, 이러한 절리면들은 $N30\sim40^{\circ}E$ /수직인 절리면과 연결되면서 북동쪽의 주굴 방향으로 발달한다. 첫 번째 호수광장은 $N70^{\circ}E$ /수직인 절리가 발달하고, 이에 사교하거나($N45^{\circ}W/75^{\circ}SW$, $EW/75^{\circ}N$), 나란하게 발달한($N40^{\circ}E/85^{\circ}NW$, $N50^{\circ}E$ /수직 등)절리로 인하여 지굴이 발달한다. 첫 번째 호수에서 두 번째 호수구간과 연결되는 주굴은 $N35^{\circ}E/60^{\circ}NW$, $N20^{\circ}E/80^{\circ}EW$, $EW/50^{\circ}N$, $N60^{\circ}W$ /수직인 절리면으로 발달한다고 보고하고 있다.

최진혁 외(2012)에 의하면 성류굴 내 층리면은 주로 북동-남서방향의 주향을 보이며 경사는 수직 내지는 남동방향인데 이는 동굴발달에 영향을 미친 지질구조이며 북동-남서방향의 단열에 의해 동굴의 발달이 있다고 보고하고 있다. 또한, 2차 생성물의 파괴유형은 단열에 의한 절단 및 낙하, 기울어짐 단층운동 등이 있고 이후 일부 재성장된 2차 생성물이 관찰된다고 하였다.

김련(2011)에 의해 수정된 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.5.6). 추출된 방향성은 총 117개로 방향성을 분석하면 Fig. 3.5.7과 같다.

성류동굴 내 발달 방향성만을 분석한 결과 $N40\sim50^{\circ}E$ 의 방향성이 우세하게 발달하고 있는 것으로 분석되었다. 부수적으로는 $N70\sim80^{\circ}E$, $N50\sim70^{\circ}W$ 등의 방향성이 분포하고 있는 것으로 해석되었다.

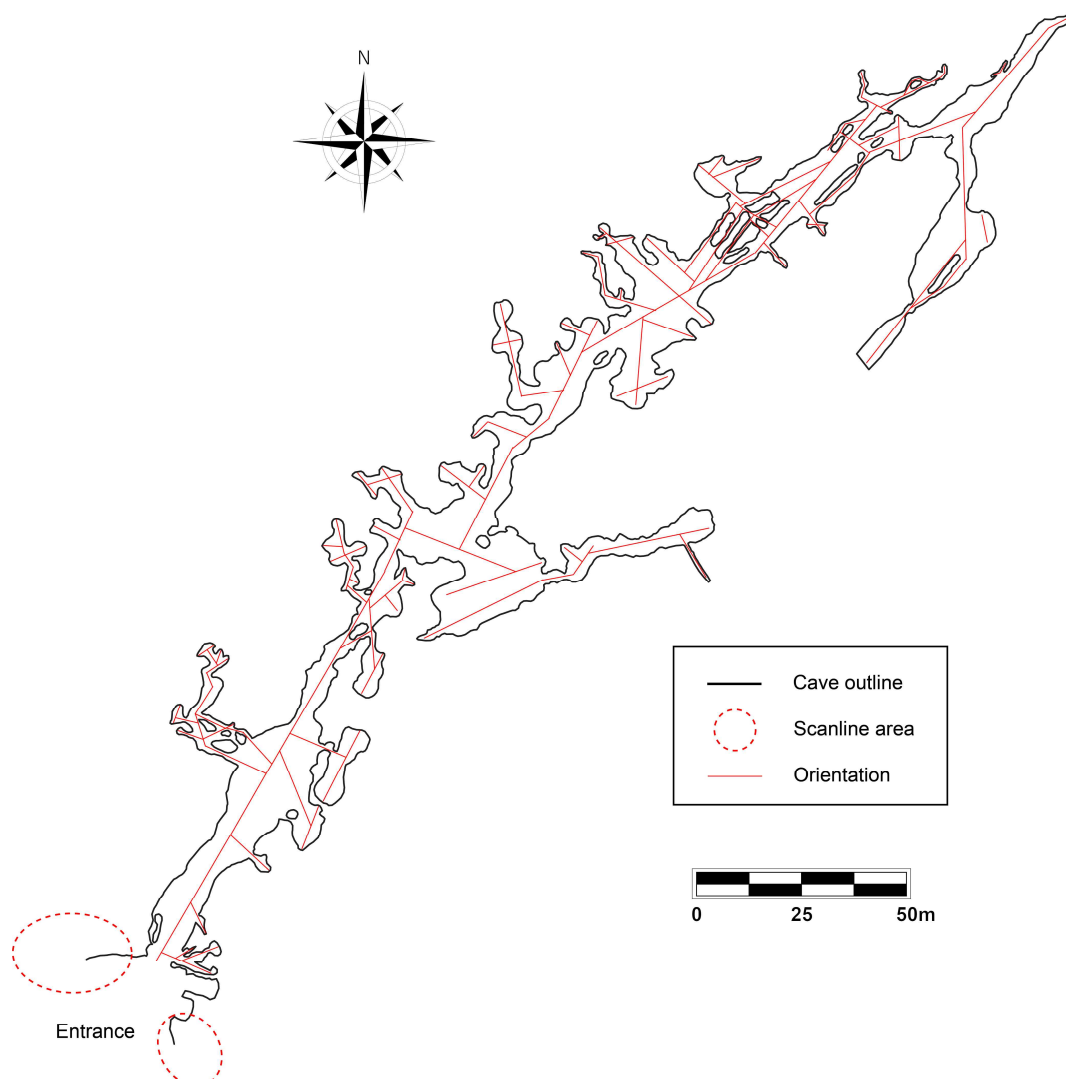


Fig. 3.5.6. Orientation in Seongnyugul Cave(based on Kim[2011]).

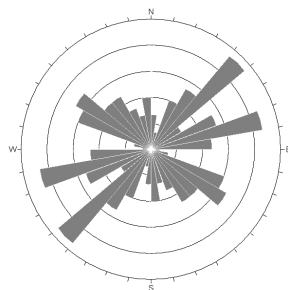


Fig. 3.5.7. Orientation analysis in Seongnyugul Cave.

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석을 위한 각 기준별 가중치 적용 개수는 Table 3.4.1과 같다.

Table 3.5.1. Weighting for persistence in Seongnyugul Cave.

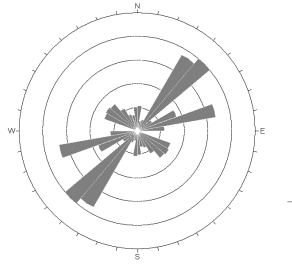
		Details			
Total orientation		143			
Average span(m)		3.72			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	132	95	73	42
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	131	122	88	57

연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서는 해석 기준에 따라 다소 상이한 형태를 보이고 있다(Fig. 3.5.8, Fig. 3.5.9).

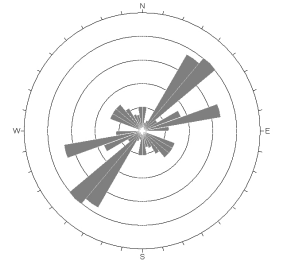
평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용하였을 경우에는 N30~50°E이 가장 우세하고 부수적으로 N70~80°E이 나타난다.

개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)에서는 N40~50°E 방향성이 가장 우세하고 부수적으로 N60~80°E과 N50~60°W 방향성이 나타나는 것으로 해석되었다.

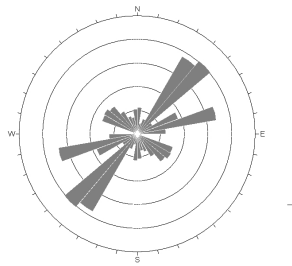
이러한 특징은 광역 선구조 분석과 비교할 때 다소 차이를 보이는 것으로 광역 선구조 패턴과 성류동굴의 발달과는 연관성이 적은 것으로 판단된다.



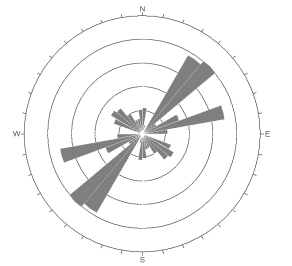
(a) including below criteria(1)



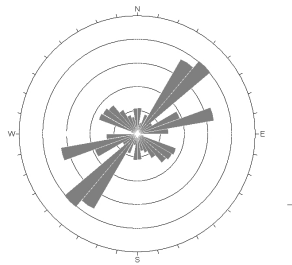
(b) excluding below criteria(1)



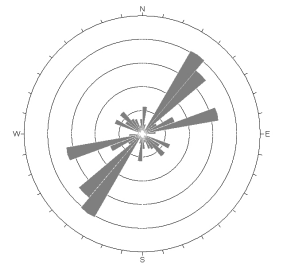
(c) including below criteria(2)



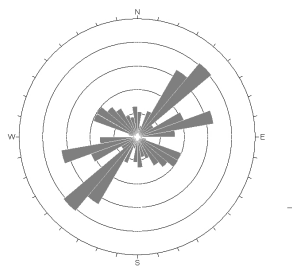
(d) excluding below criteria(2)



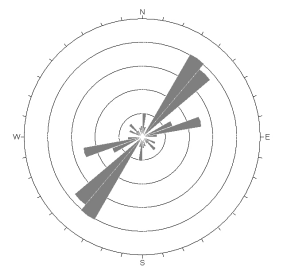
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



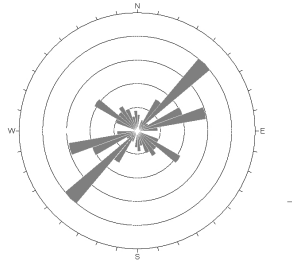
(g) including below criteria(5)



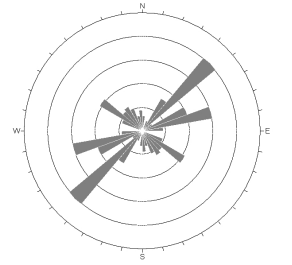
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.5.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Seongnyugul Cave.

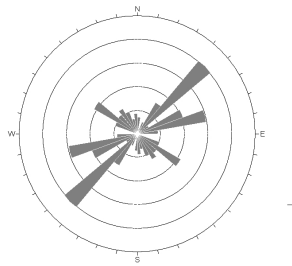
* Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio



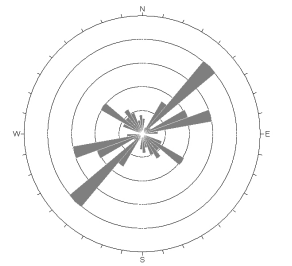
(a) including below criteria(1.5)



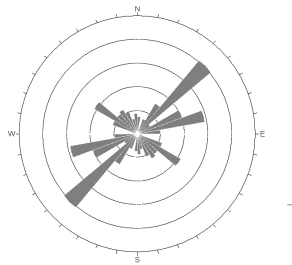
(b) excluding below criteria(1.5)



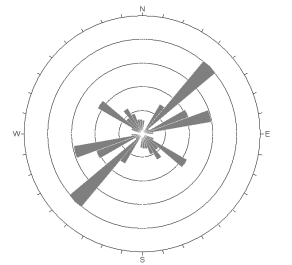
(c) including below criteria(2)



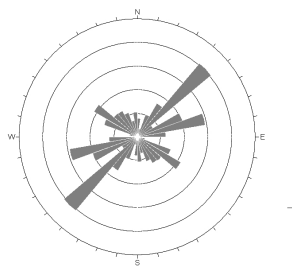
(d) excluding below criteria(2)



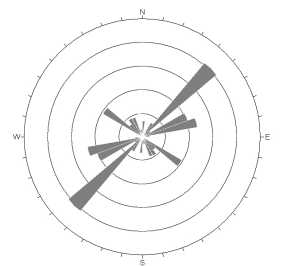
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.5.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Seongnyugul Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

단순 방향성 분석과 방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 분석에서 나타난 N30~50°E의 방향성은 성류동굴 남측에 위치한 동서 내지 북동방향의 분기된 단층의 방향성과 상당히 유사한 것으로 판단된다. 따라서, 성류동굴의 형성은 이 단층의 영향성이 컸던 것으로 판단할 수 있다.

3.5.5. 불연속면 특성 분석

성류동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 성류동굴 입구 주변 좌측 암사면과 우측 암사면에 대해 스캔라인 조사를 수행하였다 (Fig. 3.5.10).

입구 좌측 사면과 우측 사면 모두 석회암 용식에 의해 많은 굴곡을 보이고 있으며 주로 수직에 가까운 고각의 경사패턴을 보이고 있다. 층리면을 따라 일부 스펀지워크(sponge work)현상이 관찰되기도 하며 절리면을 따라 석회용식에 따른 공동(cavity)이 관찰되기도 한다.

불연속면의 틈의 경우 테라로사(terra rossa)로 일부 충전되어 있기도 하고 이끼의 충전도 확인된다. 충전이 없이 열린 상태를 보이는 틈도 많이 확인된다.

3.5.5.1. 성류동굴 입구 좌측 사면

조사구간은 약 23m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 43개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 N77°W/34°NE(set 1)과 N9°W/75°SW(set 2), N65°E/87°NW(set 3)의 방향성이 주로 발달된 것으로 분석되었다. 사면에서 주로 확인되는 방향성은 set 2와 set 3이지만 스캔라인

방향성(trend/plunge)를 고려한 해석에서 set 1의 군집도가 가장 좋게 나타났기에 로즈다이어그램(rose-diagram)에서는 나타나지 않는 특성을 보이고 있다(Table 3.5.2).



(a) Left slope



(b) Right slope

Fig. 3.5.10. Seongnyugul Cave Entrance.

$N9^{\circ}W/75^{\circ}SW$ 의 방향성은 층리방향으로 고각의 형태를 보이고 있으며 주향방향이 매화단층의 방향성과 유사하다. 또한 $N65^{\circ}E/87^{\circ}NW$ 의 방향성은 구산단층의 방향성과 유사하며, 김련(2011)이 제시한 주굴의 발달에 영향을 미친 $N40^{\circ}\sim 70^{\circ}E$ /수직의 절리면과도 유사함을 확인할 수 있다. 이 두 방향성은 성류동굴의 형성과정과 관련된 방향성을 가지는 것으로

판단된다.

N77°W/34°NE의 방향성은 광역 선구조 분석에서 나타난 방향성과 유사하지만 동굴 형성에 따른 발달과정에는 영향이 적은 것으로 판단된다.

불연속면의 간격은 타 지역의 석회동굴에 비해 상대적으로 넓은 편이며, 주로 넓은에서 매우 넓은 정도(wide~very wide spacing)를 보이고 있다. 연속성은 전체적으로 보통 정도(medium persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

3.5.5.2. 성류동굴 입구 우측 사면

우측면의 조사구간은 약 12m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 32개이다.

불연속면의 방향성을 분석한 결과 N53°W/25°NE과 N50°W/82°SW이 가장 우세하게 발달하는 방향으로 분석되었으며, 일부 N62°E/88°SE 방향성이 나타나고 있다(Table 3.5.3).

좌측 사면과 비교해 볼 때 다소 다른 방향성을 보이고 있는데, 이러한 특성은 국립지질조사소(1963)의 연구에서도 나타나는 현상으로 성류동굴 남쪽과 북쪽의 엽리의 방향성 다르게 나온다고 제시하고 있다.

또한, 최진혁 등(2012)의 연구에서는 성류굴 주 발달에 영향을 미친 북동-남서방향의 단열구조의 영향으로 해석하면서 이 영향으로 주변의 다른 방향성의 분포가 있을 수 있음을 보고하고 있다.

분석된 방향성 중 N53°W/25°NE이 우측사면의 주된 층리방향이다.

불연속면의 간격은 보통 정도(moderate spacing)를 보이는 것으로 분석되었으며, 연속성은 보통 정도(medium persistence)를 보이고 있다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린 상태에서 약간 넓은(open~moderately wide) 상태로 분석되었다.

Table 3.5.2. Discontinuities of Left lateral of Seongnyugul Cave Entrance.

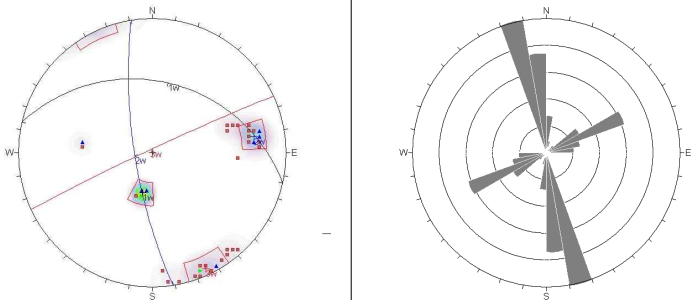
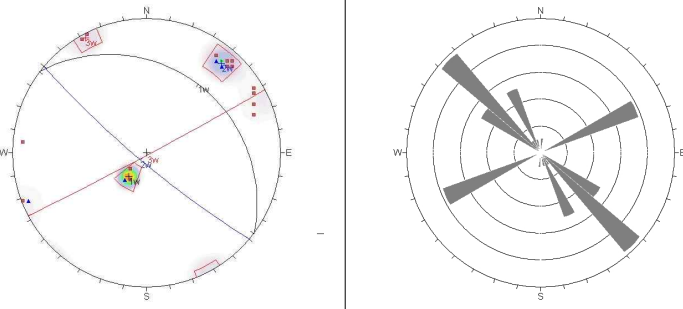
		Details		
Scanline length		23m	Trend/plunge	125/00
Number of Discontinuities		46		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (bedding)	Set 3 (joint)
		N77°W	N9°W	N65°E
		34°NE	75°SW	87°NW
Spacing (cm)	Mean	101.16	114.38	215.67
	S.D.	98.25	171.50	395.30
Persistence (m)	Mean	6.50	9.36	7.45
	S.D.	0.93	1.45	1.21
Roughness (0~20)	Mean	3.50	3.50	2.55
	S.D.	0.93	0.52	0.69
Aperture (mm)	Mean	1.75	1.21	0.82
	S.D.	1.04	0.58	0.40
Infilling		mainly sand and silty sand, open		
Seepage		mainly dry, partially wet		
Strength (MPa)		36.02	27.87	—

Table 3.5.3. Discontinuities of Right lateral of Seongnyugul Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		12m	Trend/plunge	075/00
Number of Discontinuities		32		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (bedding)	Set 3 (joint)
		N53°W	N50°W	N62°E
		25°NE	82°SW	88°SE
Spacing (cm)	Mean	45.46	50.86	20.00
	S.D.	39.91	30.35	–
Persistence (m)	Mean	8.10	7.50	5.00
	S.D.	2.13	1.17	–
Roughness (0~20)	Mean	2.70	3.83	5.00
	S.D.	0.48	0.83	–
Aperture (mm)	Mean	4.60	0.83	1.00
	S.D.	1.71	0.39	–
Infilling		mainly sand and silty sand, open		
Seepage		mainly dry, partially wet		
Strength (MPa)		19.67	27.18	–

3.6. 온달동굴

3.6.1. 현장 개요

온달동굴은 충북 단양군 영춘면 하리 온달산성 내에 위치하는 자연 석회동굴로 성산 기슭에 위치하고 있다. 동굴 북서측에 남한강이 흐르고 있는 지형을 보이고 있다(Fig. 3.6.1).

1979년 6월 우리나라 천연기념물 제 261호로 지정되었으며 과거 1975년경 잠시 공개되었다가 폐쇄되었고 재정비 후 1997년부터 일반인에게 공개되고 있다.

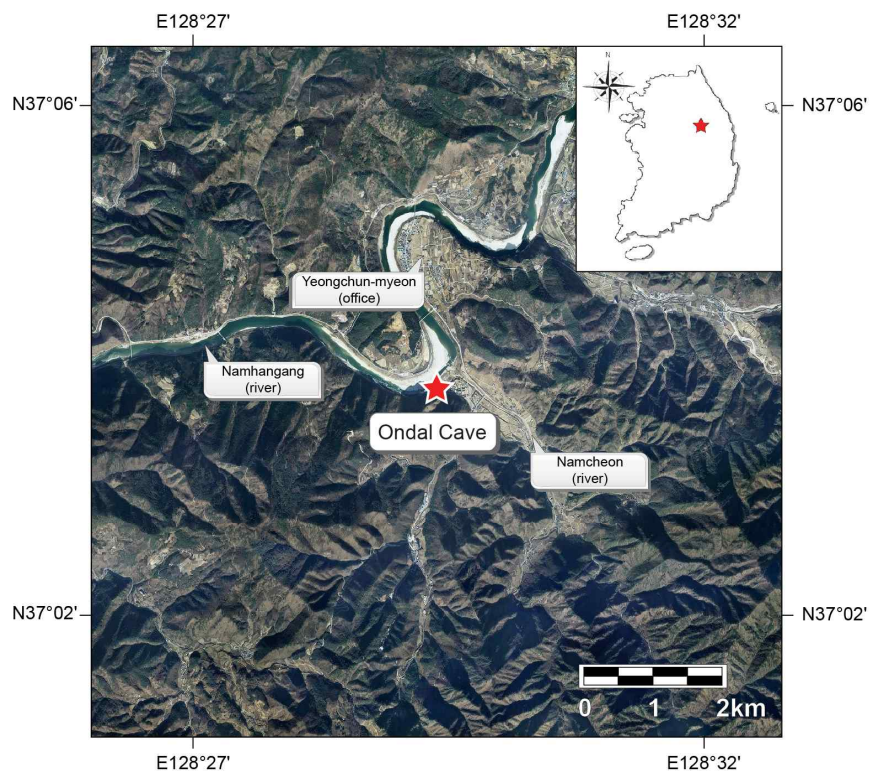


Fig. 3.6.1. Location map of Ondal Cave(based on Website map.naver.com).

3.6.2. 광역 선구조

온달동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.6.2).

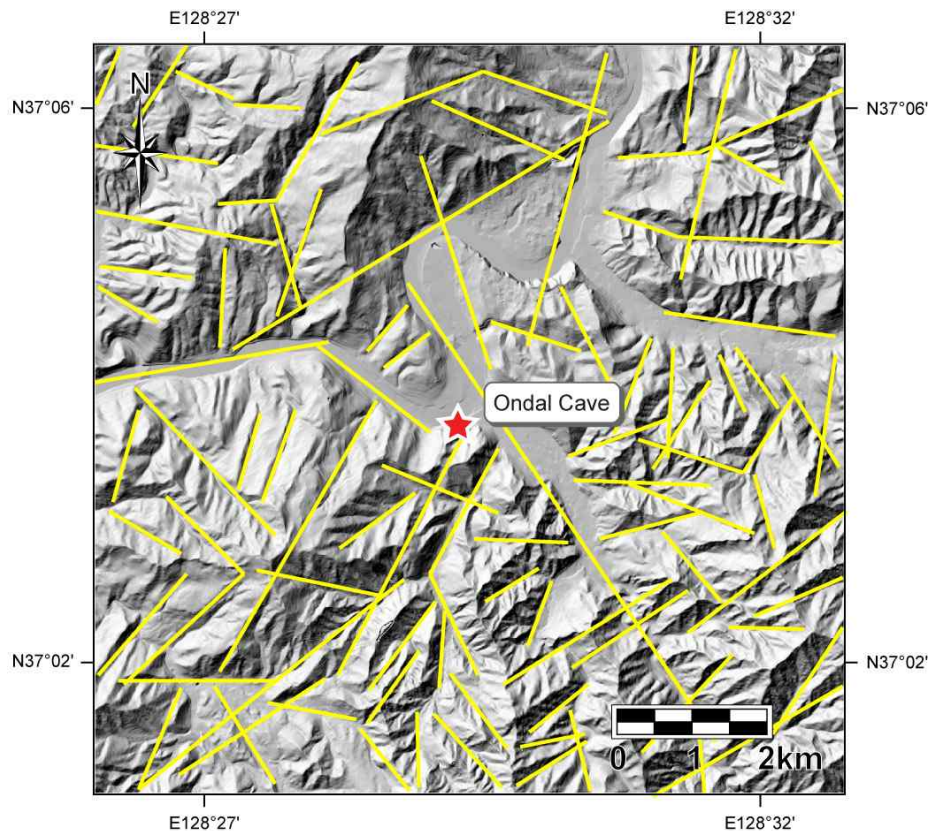


Fig. 3.6.2. Lineaments around Ondal Cave.

온달동굴 주변 광역 선구조는 총 94개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선구조의 방향성만을 분석한 결과, N50~60°E 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, N70~90°W와 N20~40°E, N30~40°W의 방향성이 부수적으로 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 3.6.3).

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 N50~60°E 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, N30~40°W과 N30~40°E, N8

0~90°W의 방향성이 이차적인 것으로 나타났다(Fig. 3.6.4).

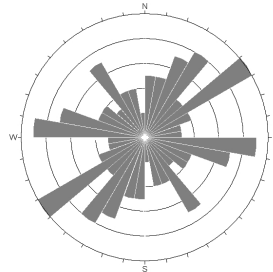
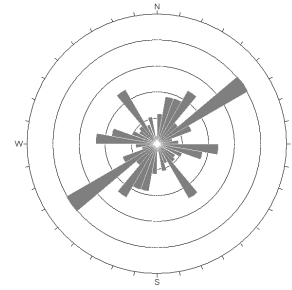
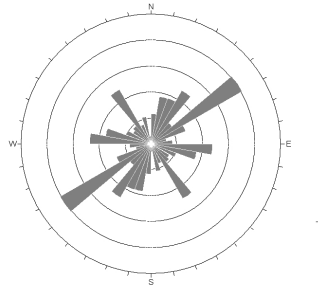


Fig. 3.6.3. Orientation analysis of lineaments around Ondal Cave.

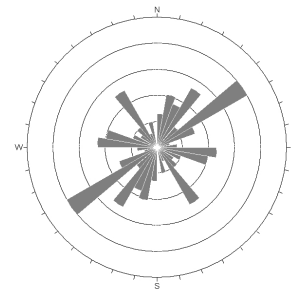
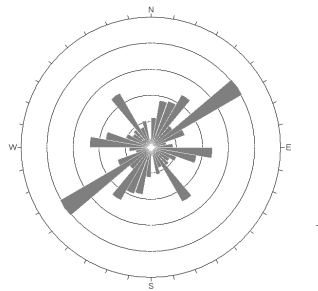
선구조 분석시 나타난 N50~60°E, N70~90°W와 N20~40°E, N30~40°W 등의 방향성이 온달동굴의 형성에 강력한 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

3.6.3. 지질특성

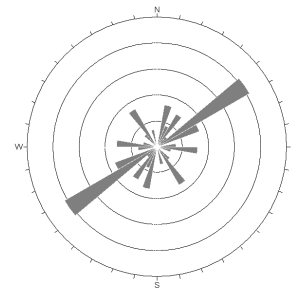
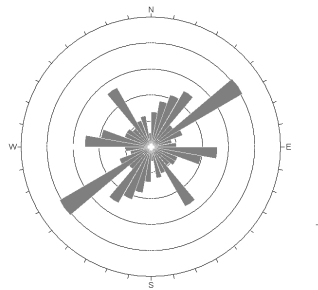
국립지질조사소(1967)와 정창희 외(1994)에 의하면 온달동굴 주변은 하부에서부터 캄브리아기의 장산규암층, 묘봉층, 풍춘석회암층, 화절층, 오르도비스기의 동점규암층, 두무동층, 막골석회암층, 고성층이 정합적 관계를 이루며 분포하는 것으로 분석하고 있다. 이 위에 정합관계를 이루고 있는 페름기의 홍점통, 사동통, 고방산통이 부정합관계로 덮고 있다. 온달동굴이 위치하는 지층은 고성층으로 얇은 세일이 많이 협재된 석회암층에 분포하는 것으로 파악하고 있으며 이 층의 주향 N15°E, 경사 60°NW로 분석하고 있다(Fig. 3.6.5).



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.6.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Ondal Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

또한, 고성층과 정합관계를 이루는 막골층은 담회색 내지 암회색의 석회암층이며, 하부는 녹회색 셰일을 협재하며 상부는 암회색과 녹회색 석회암이 교호된다고 보고하고 있다. 이 층의 주향은 N30°E, 경사 50°NW

로 분석했다.

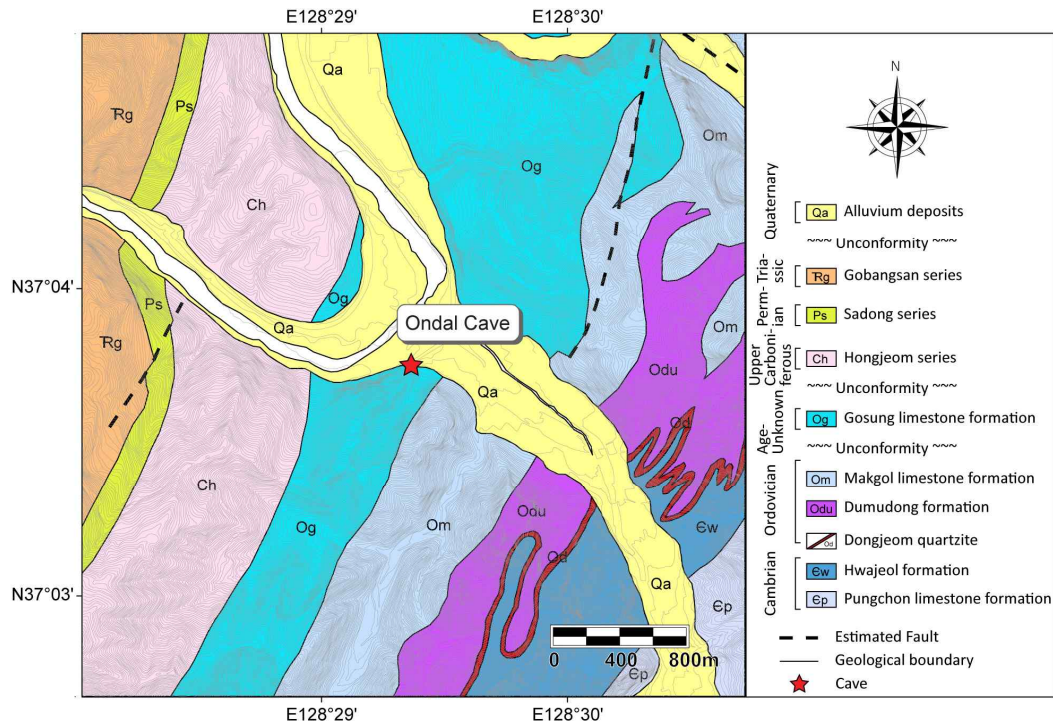


Fig. 3.6.5. Geologic map of Ondal Cave(by Korea Geological Survey[1967]).

홍대철과 변대준(1993), 홍시환(1995)의 연구에서도 해당지층을 고성층으로 판단하고 있으며 온달동굴 내 습곡을 확인하고 습곡작용이 동굴형성에 영향을 미쳤을 것으로 판단하고 있다.

이에 반해 김련(2011)은 온달동굴이 위치하는 지층을 고성층 하부에 정합된 막골층으로 해석하고 있다. 향사와 배사 구조가 여러 차례 반복적으로 나타나는 습곡의 영향을 받고 있는 지역이며 생교란작용을 받은 석회암과 엽층리가 발달한 석회암, 평력석회암 등이 호층을 이루며 분포한다고 보고하고 있다.

동굴 주변의 지층은 좀더 정확한 해석을 위해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 일부 고성층의 의견도 있지만 막골층으로 해석하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3.6.4. 동굴특성

홍현철과 변대준(1993)의 연구에 의하면 수평굴이며 직선형 동굴로 분석하고 있으며, 지굴의 발달이 미약한 것으로 보고 있다.

홍시환(1995)의 연구에 의하면 온달동굴은 직선의 형태를 보이는 구조를 보이며 내부의 물이 외부로 유출되는 토출형 동굴로 분석하고 있다. 외부의 테라로사(terra rossa)가 동굴 내부로 유입되어 퇴적되는 양상을 보이며 측방침식이 강하게 나타나는 것으로 분석하였다.

김련(2011)의 연구에 의하면 온달동굴은 북서-남동 방향의 주굴(주된 발달방향)과 지굴(가지굴)및 북동-남서 방향의 지굴의 발달이 우세하다고 보고하고 있다. 온달동굴 내에 단층의 발달을 제시하고 있으며 북서-남동은 단층면을 따라서, 북동-남서 방향의 발달은 성층면을 따라서 발달하는 특징을 보이며 좁고 긴 협곡형태의 석회동굴로 해석하였다. 또한, 석회암층 내에는 불용성 이질암들이 호층을 이루고 있는 상태이며, 석회암 부분은 용식작용을 받아 패이고, 이질암 부분은 용식되지 않는 특성을 보인다고 제시하고 있다.

성층면의 주향과 경사는 N10°E/80°SE, N10~45°E/50~90°NW, N60°E/70°NW, N15°E/수직이다. 주굴은 N40~50°W/수직인 좌수향 단층을 따라 발달한다. 지굴은 N30°E/60°NW, EW/65°N, N80°E/70°SE, N70~75°W/수직, N60°W/수직, EW/수직, N40°W/70°NE, N60°E/80°NW, N50~55°W/75~90°SW의 방향성을 보이는 단층면과 절리들을 따라 발달한다고 분석하고 있다.

김련(2011)에 의해 제시된 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.6.6).

추출된 방향성은 총 162개로 방향성만을 분석한 결과 N0~10°E, N10~20°E 방향성이 일부 우세한 것처럼 보이지만 전체 방향성 18개 중 각각 8%씩만 분포하고 있다. 그 외에 N20~30°E, N40~50°E, 10~20°W, 30~40°W, 50~60°W, 70~80°W의 방향성도 우세하게 발달하고 있기 때문에 특정 방향으로의 발달 가능성을 제시하기는 어렵다(Fig. 3.6.7).

또한, 동굴도를 육안으로 판단할 때 북서-남동방향과 북북동-남남서방향이 우세할 것으로 생각되는 방향성과는 다른 결과를 보여주고 있다(Fig. 3.6.6). 즉, 동굴 발달방향성만을 놓고 판단한다면 전체 동굴의 발달 방향성을 정확하게 판단하기 어렵다고 할 수 있다.

Table 3.4.1의 가중치 조건을 바탕으로 연장성을 이용해 가중치를 적용한 결과, Fig. 3.6.8과 Fig. 3.6.9와 같은 해석이 도출되었다.

Table 3.6.1. Weighting for persistence in Ondal Cave.

		Details			
Total orientation		162			
Average span(m)		2.42			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	156	114	80	43
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	155	137	106	54



Fig. 3.6.6. Orientation in Ondal Cave(based on Kim[2011]).

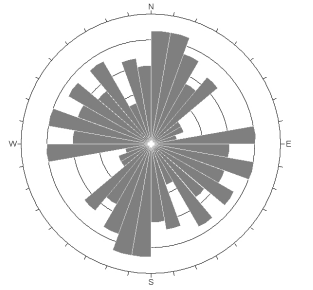


Fig. 3.6.7. Orientation analysis in Ondal Cave.

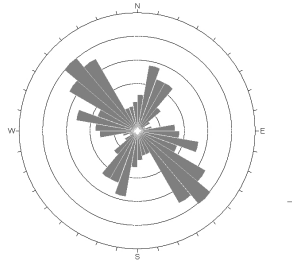
연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석을 통해서 보면 두 해석 조건에 따라 다소 다른 형태를 보이고 있기는 하지만, 전체적으로 동굴의 실제 발달 방향성을 잘 나타내고 있다(Fig. 3.6.8, Fig. 3.6.9).

평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용하였을 경우에는 N40~50°W 방향성을 중심으로 N30~60°W이 가장 우세하고 부수적으로 N10~40°E과 N70~80°W 방향성이 나타나는 것으로 해석되었다.

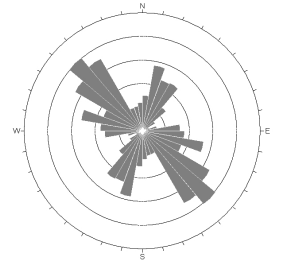
이와 달리 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)에 서는 N30~40°W를 중심으로 N40~90°W와 N80~90°E 방향성이 부합되어 우세하게 나타나고 있으며 N0~40°E의 방향성도 같이 나타나고 있다.

이러한 특징은 김련(2011)에 의한 연구와도 일치하는 것으로 N40~50°W은 좌수향 단층의 의해 형성된 방향성이고 N10~40°E은 막골층 내 층리의 방향성을 지시하는 것으로 해석된다.

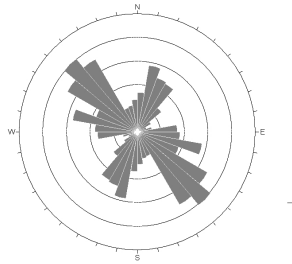
이러한 방향성 특성은 광역 선구조 분석에서는 명확하게 확인되지 않고 있다. 따라서, 온달동굴이 위치하는 지층 내 단층이 외부로 강하게 발달하기 보다는 국부적으로 발달하였기 때문으로 판단된다. 또한, 층리면의 경우 내부 습곡의 영향으로 인해 온달동굴 외부의 층리면이 일부 변형되어 내부에 위치하고 있는 것으로 판단된다.



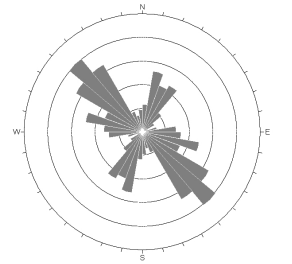
(a) including below criteria(1)



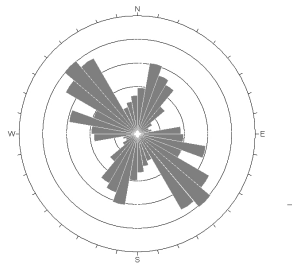
(b) excluding below criteria(1)



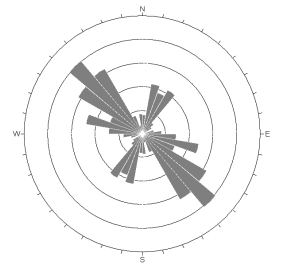
(c) including below criteria(2)



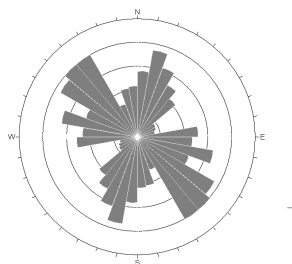
(d) excluding below criteria(2)



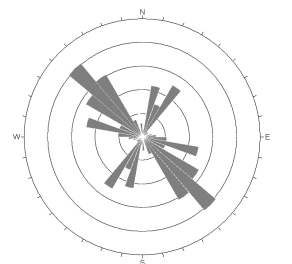
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



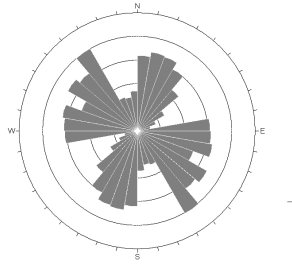
(g) including below criteria(5)



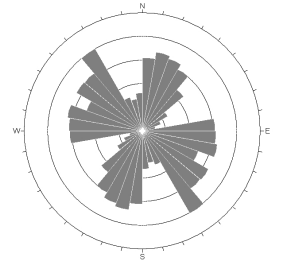
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.6.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Ondal Cave.

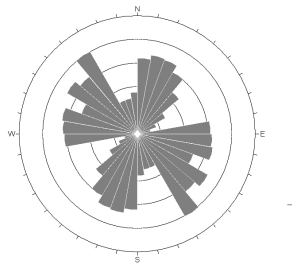
** Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio*



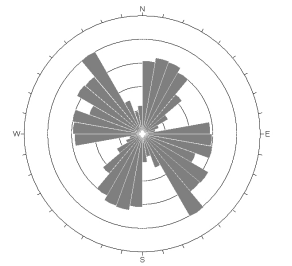
(a) including below criteria(1.5)



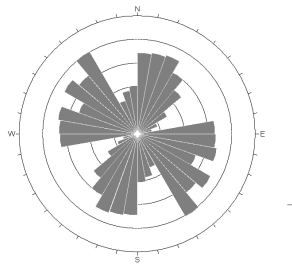
(b) excluding below criteria(1.5)



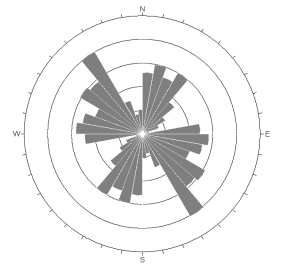
(c) including below criteria(2)



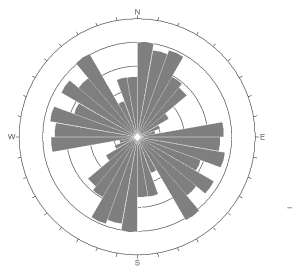
(d) excluding below criteria(2)



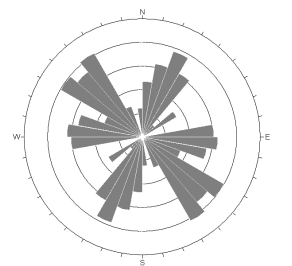
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.6.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Ondal Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

3.6.5. 불연속면 특성 분석

온달동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 온달동굴 입구 내 좌측면과 우측면에 대해 스캔라인 조사를 수행하였다(Fig. 3.6.10).



(a) Left lateral



(b) Right lateral

Fig. 3.6.10. Ondal Cave Entrance.

온달동굴 입구의 안전성을 확보하기 위해 입구에서 약 5~6m 구간은 입구 보강이 이루어진 상태이다.

입구 좌측면과 우측면 모두 석회암 용식에 의해 많은 굴곡을 보이고 있으며 좌측면의 경우 Fig. 3.6.7 (a)에서 보는 바와 같이 표면의 용식은 적으며 외부에서 유입된 테라로사의 침전퇴적이 있는 것으로 확인되고 있다.

우측면의 경우 동굴수의 흐름이 있는 구간으로 좌측면에 비해 층리면을 따라 용식흔적이 관찰되고 있다.

3.6.5.1. 온달동굴 입구 좌측

조사구간은 약 5.8m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개

수는 총 43개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 $N3^{\circ}W/52^{\circ}NE$ (set 1)과 $N83^{\circ}E/48^{\circ}SE$ (set 2)의 방향성이 주로 발달된 것으로 분석되었다. 부수적으로 $N68^{\circ}W/53^{\circ}SW$ (set 3)과 $N65^{\circ}W/87^{\circ}SW$ (set 4)의 방향성이 나타나고 있다 (Table 3.6.2).

남북방향의 $N3^{\circ}W/52^{\circ}NE$ 좌측면에 위치하는 층리면이며 이 방향성은 선구조 분석 및 동굴 발달 방향성 분석에서 명확히 관찰되지 않은 방향이다. 이는 습곡과 같은 지구조적 영향을 국부적으로 받아 층리면이 변형되어 나타난 것으로 판단된다.

$N83^{\circ}E/48^{\circ}SE$ 의 방향성은 주로 층리면을 가로질러 발달하는 절리로 역시 선구조 분석 및 동굴 발달 방향성 분석 분석에서 잘 관찰되지 않은 방향이다. 이도 국부적인 지구조적 영향으로 나타나는 특성을 추정된다.

불연속면의 간격 중 set 1은 조밀한 정도(close spacing)를 보이고 다른 군집은 극히 조밀한 정도(extremely close spacing)에서 매우 조밀한 정도(very close spacing)를 보인다. 연속성은 전체적으로 매우 낮은 정도에서 낮은 정도(very low~low persistence)를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

3.6.5.2. 온달동굴 입구 우측

우측면의 조사구간은 약 3m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 54개이다.

불연속면의 방향성을 분석한 결과 주로 층리면을 보이는 방향성만이 주로 측정이 되었으며 방향성은 $N22^{\circ}W/62^{\circ}SW$ (set 1)과 $N35^{\circ}W/80^{\circ}$

SW(set 2)로 분석되었다(Table 3.6.3).

우측면의 방향성의 경우 좌측면과 다소 상이한 방향을 보고 있다. 경사면의 방향이 반대를 향하고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 특성은 주변에 습곡의 영향을 추정할 수 있는데 내부 용식 등의 영향으로 습곡축(fold axis)을 확인할 수는 없었다.

불연속면의 간격은 매우 조밀한 정도에서 조밀한 정도(very close~close spacing)를 보이는 것으로 분석되었으며, 연속성은 낮은 정도(low persistence)를 보이고 있다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

Table 3.6.2. Discontinuities of Left lateral of Ondal Cave Entrance.

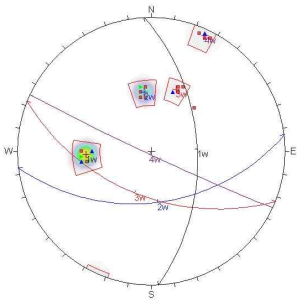
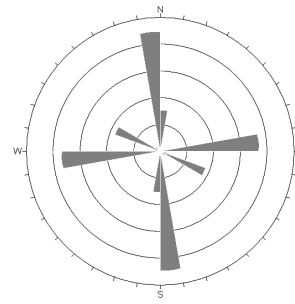
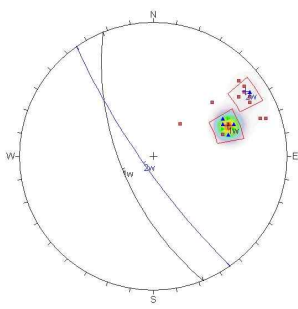
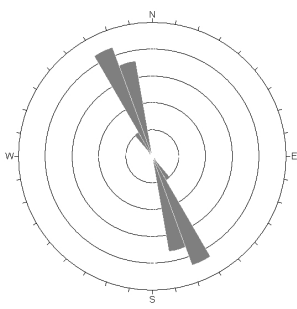
		Details			
Scanline length		5.8m	Trend/plunge		045/00
Number of Discontinuities		43			
Stereonet					
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)	Set 4 (joint)
		N3°W	N83°E	N68°W	N65°W
		52°NE	48°SE	53°SW	87°SW
Spacing (cm)	Mean	18.09	1.56	2.20	2.00
	S.D.	31.95	0.28	0.37	0.81
Persistence (m)	Mean	1.02	0.95	0.60	1.80
	S.D.	0.46	0.42	0.22	0.45
Roughness (0~20)	Mean	4.10	2.36	2.80	3.60
	S.D.	1.37	0.81	1.10	0.89
Aperture (mm)	Mean	1.62	1.82	1.40	1.80
	S.D.	0.80	0.40	0.55	0.45
Infilling		mainly sand and silty sand, partially open			
Seepage		mainly wet, partially dry			
Strength (MPa)		58.2	–	–	–

Table 3.6.3. Discontinuities of Right lateral of Ondal Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		3.0m	Trend/plunge	045/00
Number of Discontinuities		54		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (bedding)	
		N22°W	N35°W	
		62°SW	80°SW	
Spacing (cm)	Mean	3.14	10.54	
	S.D.	0.99	8.10	
Persistence (m)	Mean	1.37	1.13	
	S.D.	0.22	0.23	
Roughness (0~20)	Mean	3.43	5.25	
	S.D.	0.91	1.04	
Aperture (mm)	Mean	0.76	0.88	
	S.D.	0.43	0.35	
Infilling		mainly silty sand, partially open		
Seepage		mainly wet, partially dry		
Strength (MPa)		58.2	—	

3.7. 용연동굴

3.7.1. 현장 개요

용연동굴은 강원도 태백시 화전동에 위치하는 자연 석회동굴로 금대봉(1,418m) 서측 용수골 기슭에 위치하고 있다. 개방된 석회동굴 중 가장 높은 해발 920m의 산지에 위치하고 있으며 주변에 황지천이 발원하는 작은 하천의 흐름이 있다(Fig. 3.7.1).

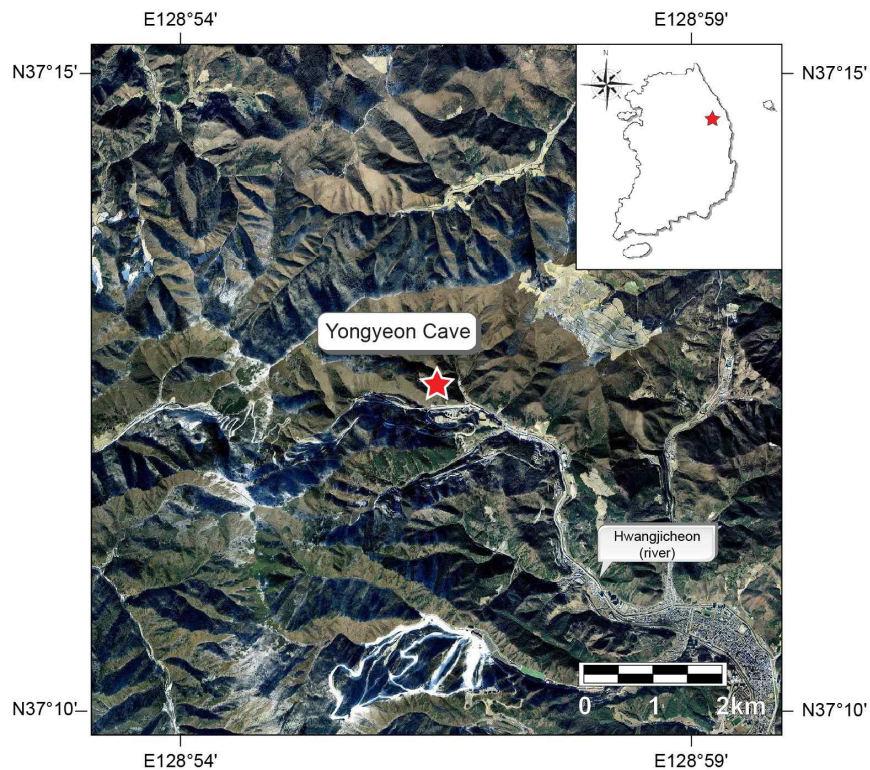


Fig. 3.7.1. Location map of Yongyeon Cave(based on Website map.naver.com).

과거 임진왜란과 국가변란 때 피난처로 이용되기도 하였으며, 1980년

2월 강원도 시도기념물 제 39호로 지정되었다. 입출구가 하나로 내부에 큰 4개의 광장이 있고 일반인에게 개방되어 있다.

3.7.2. 광역 선구조

용연동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.7.2).

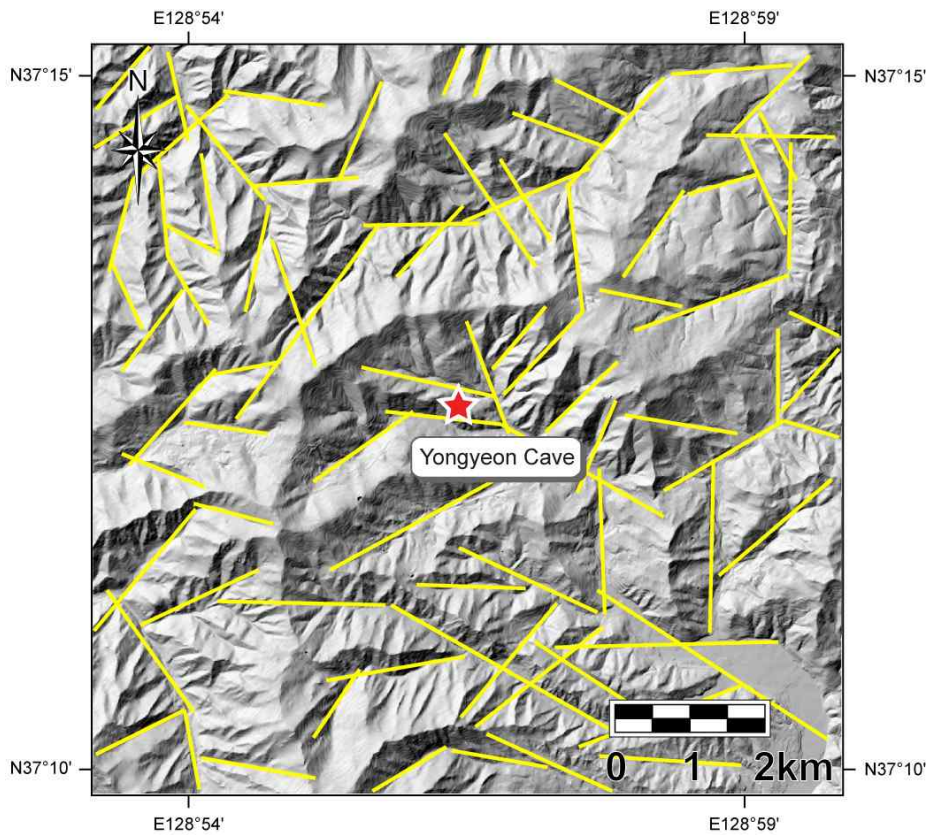


Fig. 3.7.2. Lineaments around Yongyeon Cave.

용연동굴 주변 광역 선구조는 총 94개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선구조의 방향성만을 분석한 결과, N40~50°E 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, N80~90°W와 N60~70°W의 방향성이 부수적으로 나타

나고 있다(Fig. 3.7.3).

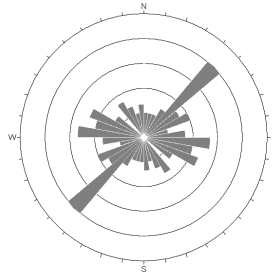
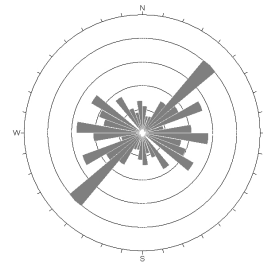
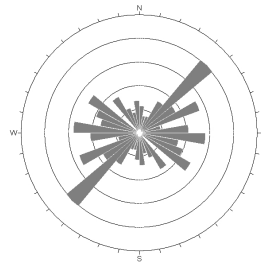


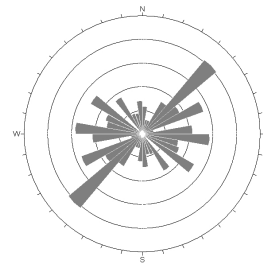
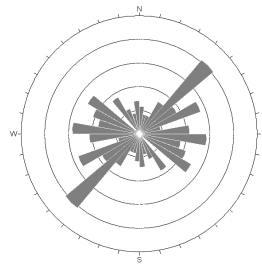
Fig. 3.7.3. Orientation analysis of lineaments around Yongyeon Cave.

Fig. 3.7.4에서 보는 바와 같이 방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 $N40\sim50^{\circ}E$ 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었다. 또한, $N80\sim90^{\circ}W$ 과 $N50\sim60^{\circ}W$, $N60\sim70^{\circ}E$ 의 방향성이 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 특징은 전체적으로 유사하게 나타나고 있다. 기준을 2km로 설정하고 기준이하를 제외시킨 경우만이 다른 경우의 부수적 발달양상이었던 $N50\sim60^{\circ}W$ 이 가장 우세하고, $N60\sim70^{\circ}E$ 이 부수적으로 나타나는 특징을 보이고 있다(Fig. 3.7.4 (f)). 이러한 이유는 우세하게 발달된 $N40\sim50^{\circ}E$ 방향성이 2km 이하인 경우가 많아서 나타난 특성으로 판단된다.

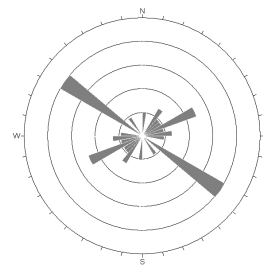
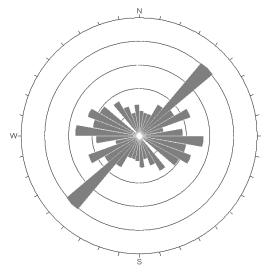
전체적으로는 $N40\sim50^{\circ}E$ 방향이 우세하지만, 용연동굴 주변 계곡 건너편에서 나타나는 특성을 보이고 있다. 용연동굴 주변에는 $N78^{\circ}W$ 와 $N84^{\circ}W$, $N21^{\circ}W$ 의 방향성을 보이는 형태가 우세하다. 이를 바탕으로 판단할 때 용연동굴의 형성에 전체 광역적인 우세 방향인 $N40\sim50^{\circ}E$ 의 영향보다는 주변에서 나타나는 선구조와의 연관성을 보이고 있을 것으로 판단된다.



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.7.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Yongyeon Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

3.7.3. 지질특성

국립지질조사소(1962)에 의하면 용연동굴 주변은 하부에서부터 캄브리아기의 장산규암층, 묘봉층, 풍춘석회암층, 화절층, 오르도비스기의 동점

규암층, 두무동층, 막골석회암층이 정합적 관계를 이루며 분포하는 것으로 분석하고 있다. 이 위에 정합관계를 이루고 있는 상부석탄기의 홍점통, 폐름기의 사동통, 트라이아스기의 고방산통과 녹암통이 부정합관계로 덮고 있다. 용연동굴이 위치하는 지층은 막골석회암층으로 설명하고 있다. 용연동굴 남측의 38번 국도를 따라 동서 내지는 북서서-남동동 방향의 단층이 있었고 이후 용연동굴 동측의 용연동굴 매표소 부근에 남북 내지 북북서-남남동 방향의 단층으로 사교되는 지구조적 변화를 설명하고 있다(Fig. 3.7.5).

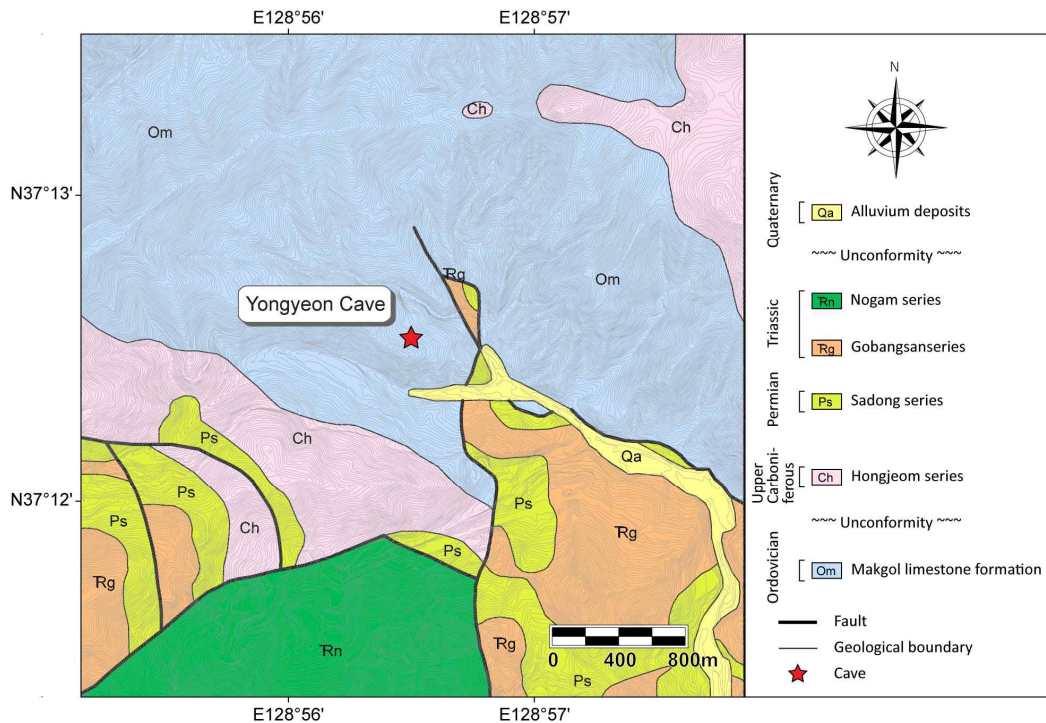


Fig. 3.7.5. Geologic map of Yongyeon Cave(by Korea Geological Survey[1962]).

오종우(1993)에 의하면 용연동굴 주변은 태백산 지향사대에 속하고 습

곡과 단층작용에 의한 지구조 형상이 매우 복잡한 양상을 가진다고 한다. 용연동굴을 배태시킨 모암을 조선계 막동석회암류의 막골석회암으로 설명하고 있으며 회색의 백운암질 석회암(dolomitic limestone)이다.

최돈원과 우경식(1996)의 연구에 의하면 용연동굴 동측의 단층을 함백산단층으로 설명하며 단층 서부에는 막골층이 동부에는 만항층이 분포한다고 한다. 막골층의 방향성은 N25~30°E/14~44°NW로 거의 일정한 방향성을 보인다고 한다.

3.7.4. 동굴특성

오종우(1993)에 의하면 용연동굴 주변은 해수면의 승강작용과 융기작용 등의 지구조적인 요인에 영향을 받은 것으로 해석하고 있다. 일차적으로 공극률의 팽창작용에 의해 분해도가 상승하여 풍화도가 증대하고 기반암의 차별침식으로 카렌펠트(karrenfield)을 형성했다. 암석의 절리면 또는 구개면, 단층면 등에 의해 확장작용으로 지하동굴의 확산이 있었고 탄산염의 조형작용에 의해 중유동굴로 발달한 것으로 보고하고 있다.

최돈원과 우경식(1996)의 연구에 의하면 모암의 층리면과 절리면의 주향방향을 따라 지하수가 여러 곳으로부터 유입되어 용식작용과 하각작용에 의해 수평방향으로 형성된 수평굴로 설명하고 있다.

김련(2011)에 의해 제시된 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.7.6). 추출된 방향성은 총 51개로 방향성을 분석하면 Fig. 3.7.7과 같다.

용연동굴 내 발달 방향성만을 분석한 결과 N20~30°E 방향성이 가장 우세한 것으로 나타나고 있으며, 다음으로 N0~10°W과 N20~30°W 방향이 우세하다.

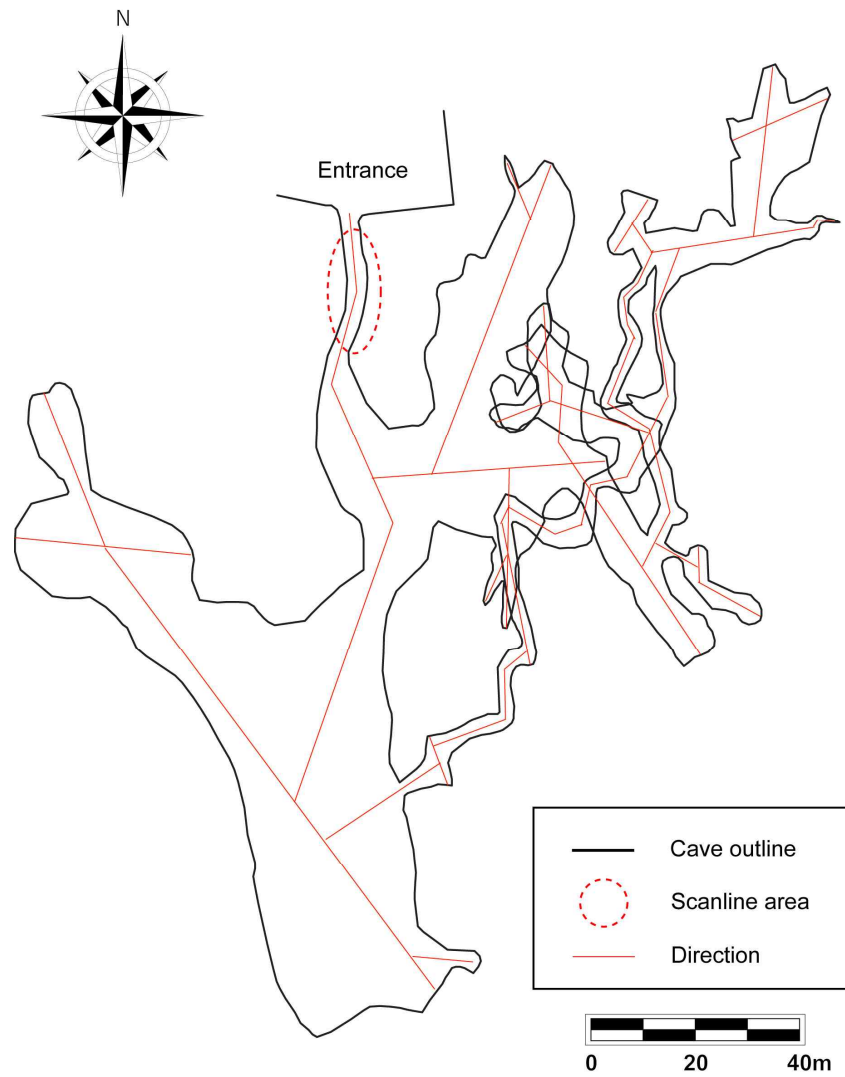


Fig. 3.7.6. Orientation in Yongyeon Cave(based on Kim[2011]).

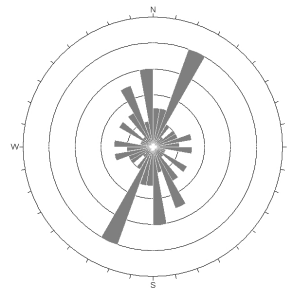


Fig. 3.7.7. Orientation analysis in Yongyeon Cave.

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석을 위해 전체 폭의 평균을 산출한 결과, 약 5.97m인 것으로 분석되었으며 각 기준별 가중치 적용 개수는 Table 3.7.1과 같다.

Table 3.7.1. Weighting for persistence in Yongyeon Cave.

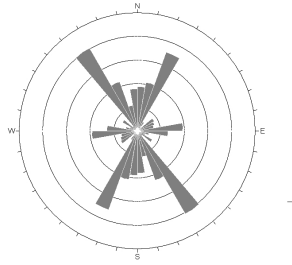
		Details			
Total orientation		51			
Average span(m)		5.97			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	43	25	15	9
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	45	38	22	5

Fig. 3.7.8과 Fig. 3.7.9에서 보는 바와 같이 방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석은 기준에 따라 다른 결과를 보이고 있다.

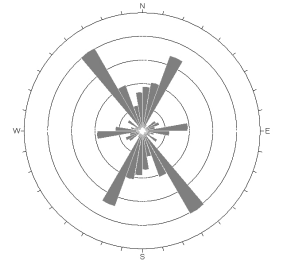
평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용하였을 경우에는 N30~40°W 방향성이 가장 우세하며 부수적으로 N20~30°E가 우세하다.

그러나, 개별 발달 비율법(Individual Developing Ratio Method)을 적용한 경우에는 N20~30°E 방향성이 가장 우세하며, 이차적으로 N0~10°W와 N20~30°W 방향성이 우세한 것으로 나타나고 있다.

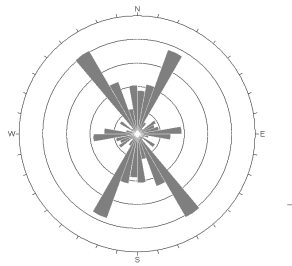
두 결과를 종합해 볼 때 동굴의 발달에 영향을 주로 미친 방향성은 N20~30°E이며 N30~40°W는 전체적이 발달이 있지만 폭에 대한 발달성은 부족하고 N20~30°W이 폭에 대한 발달성이 우수한 것으로 판단된다.



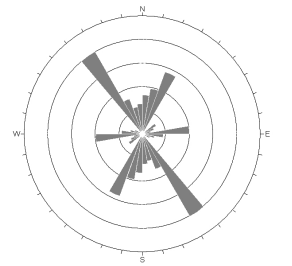
(a) including below criteria(1)



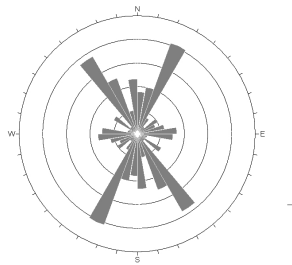
(b) excluding below criteria(1)



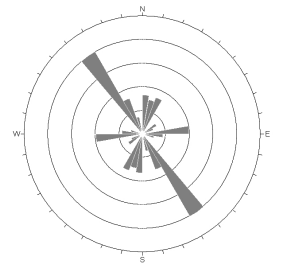
(c) including below criteria(2)



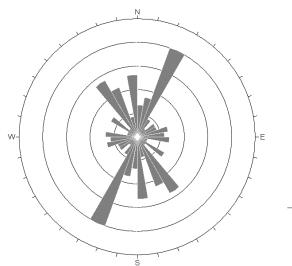
(d) excluding below criteria(2)



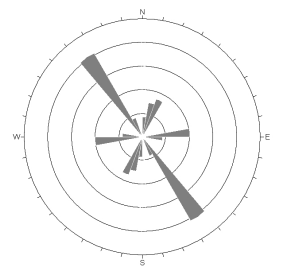
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



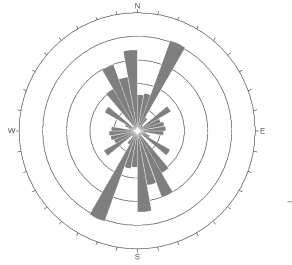
(g) including below criteria(5)



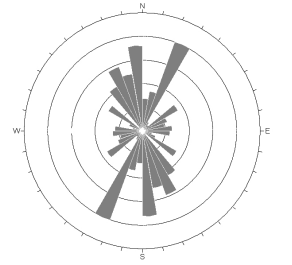
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.7.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Yongyeon Cave.

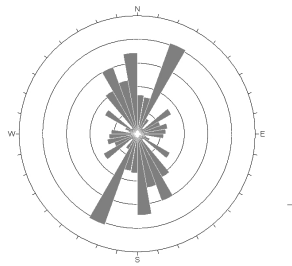
* Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio



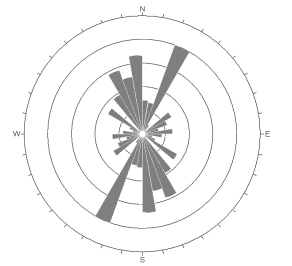
(a) including below criteria(1.5)



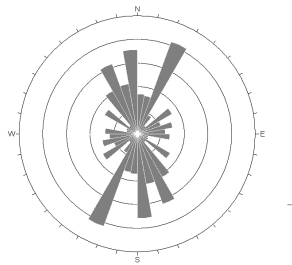
(b) excluding below criteria(1.5)



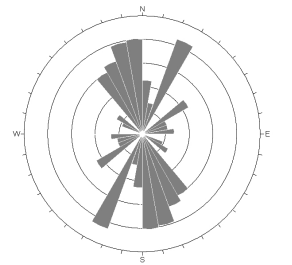
(c) including below criteria(2)



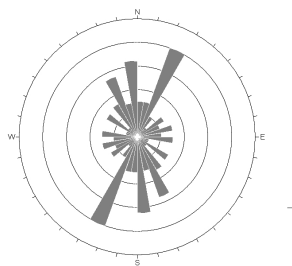
(d) excluding below criteria(2)



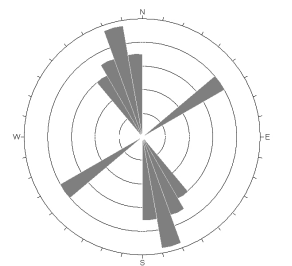
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.7.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Developing Ratio Method(IDRM) in Yongyeon Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

분석된 방향성은 광역 선구조에서 나타난 주 방향성(N40~50°E)과는 다른 패턴을 보이며, 용연동굴 주변의 선구조 방향성인 N78°W와 N84°W, N21°W의 방향성의 영향도 적은 것으로 판단된다.

동굴 발달 방향성은 동굴 동측에 발달하고 있는 용연동굴 매표소 부근의 남북 내지 북북서-남남동 방향의 단층의 방향성과 매우 유사하다. 이는 동굴의 발달 방향성은 내부의 막골층의 층리 방향성(N25~30°E/14~44°NW)보다는 동굴 주변의 단층의 영향에 의해 용연동굴이 발달된 것으로 추정할 수 있다.

3.7.5. 불연속면 특성 분석

용연동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 용연동굴 입구 내 우측면에 대해 스캔라인 조사를 수행하였다(Fig. 3.7.10).



Fig. 3.7.10 Right lateral of Yongyeon Cave Entrance.

용연동굴은 입구에서 내부로 들어가기 위해서는 계단을 이용하여 약 35도의 경사로 진입하여야 한다. 입구의 안전성을 확보하기 위해 입구에서 약 5~6m 구간은 입구 보강이 이루어진 상태이다.

입구 좌측면과 우측면 모두 석회암 용식에 의해 많은 굴곡을 보이고

있으며 좌측면의 경우 우측면에 비해 불연속면의 용식이 있고 조사에 어려움이 있기에 우측면에 대한 조사만 수행하였다.

우측면은 내외부의 온도차와 외부 지표수의 유입 등에 의한 원인으로 매우 습한 상태이고 대부분의 불연속면의 틈이 열려져 있는 상태다.

3.7.5.1. 용연동굴 입구 우측면

조사구간은 약 7m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 44개이다.

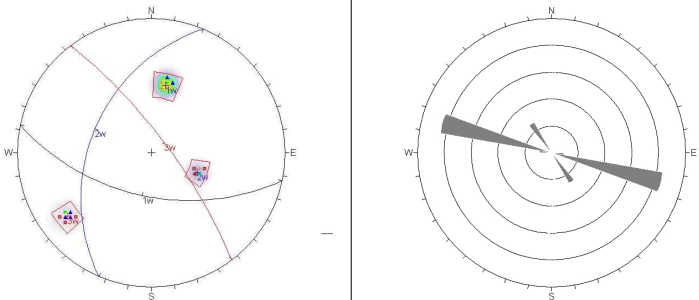
불연속면의 방향성을 조사한 결과 주 방향성으로 N78°W/54°SW(set 1)이 분석되었으며, N23°E/41°NW과 N37°W/76°NE의 방향성이 부수적으로 나타나고 있다(Table 3.7.2).

Set 1으로 분석된 방향성은 조사된 사면 내 석회암층의 층리방향으로 기존 지질조사의 막골층의 방향성과는 다소 차이가 있다. 이는 용연동굴에 위치하는 석회암층이 남측에 분포하는 동서방향의 단층과 주변에 복잡하게 발달하는 습곡의 영향을 받아 방향성에 변화가 있는 것으로 판단된다. 또한, 동굴의 발달 방향성과도 다소 상이한 방향성을 보이는 것은 층리면은 동서방향으로 발달하고 있지만 동굴의 발달은 이를 사교하는 남북방향의 방향에 영향을 받아서 나타나는 현상으로 판단된다.

불연속면의 간격은 보통 정도(moderate spacing)를 보이며, 연속성은 보통 정도(medium persistence)로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

Table 3.7.2. Discontinuities of Right lateral of Yongyeon Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		7m	Trend/plunge	190/35
Number of Discontinuities		44		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)
		N78°W	N23°E	N37°W
		54°SW	41°NW	76°NE
Spacing (cm)	Mean	20.65	24.54	52.15
	S.D.	20.96	23.96	55.13
Persistence (m)	Mean	3.55	3.03	3.17
	S.D.	0.51	0.74	0.39
Roughness (0~20)	Mean	3.35	3.41	3.42
	S.D.	0.67	0.71	1.08
Aperture (mm)	Mean	1.10	0.82	1.25
	S.D.	0.45	0.39	0.87
Infilling		mainly open, partially silty sand		
Seepage		mainly wet		
Strength (MPa)		25.92	27.49	—

3.8. 천곡동굴

3.8.1. 현장 개요

천곡동굴은 강원도 동해시 천곡동에 위치하며 국내에서 유일하게 도심에서 확인된 자연 석회동굴이다. 태백산맥의 일부인 초록봉의 동측의 구릉에 위치한 동굴로 동해와 가깝게 인접한 동굴이다(Fig. 3.8.1).

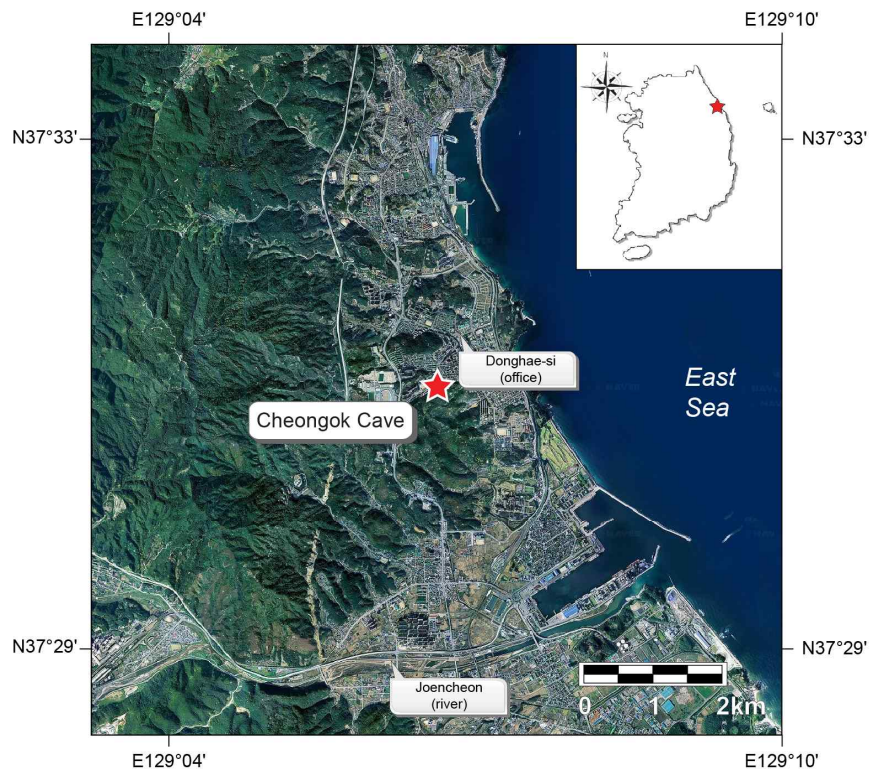


Fig. 3.8.1. Location map of Cheongok Cave(based on Website map.naver.com).

1991년 6월 천곡동 신시가지 기반 조성 공사를 통해 발견된 동굴로써 천연문화재의 보전적 가치는 부족하다는 판단으로 문화재 지정은 되지

않았다. 그러나 석회동굴의 형성과 자연학습의 목적으로 보수하여 일반인에게 공개되어 있다.

3.8.2. 광역 선구조

천곡동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.8.2).

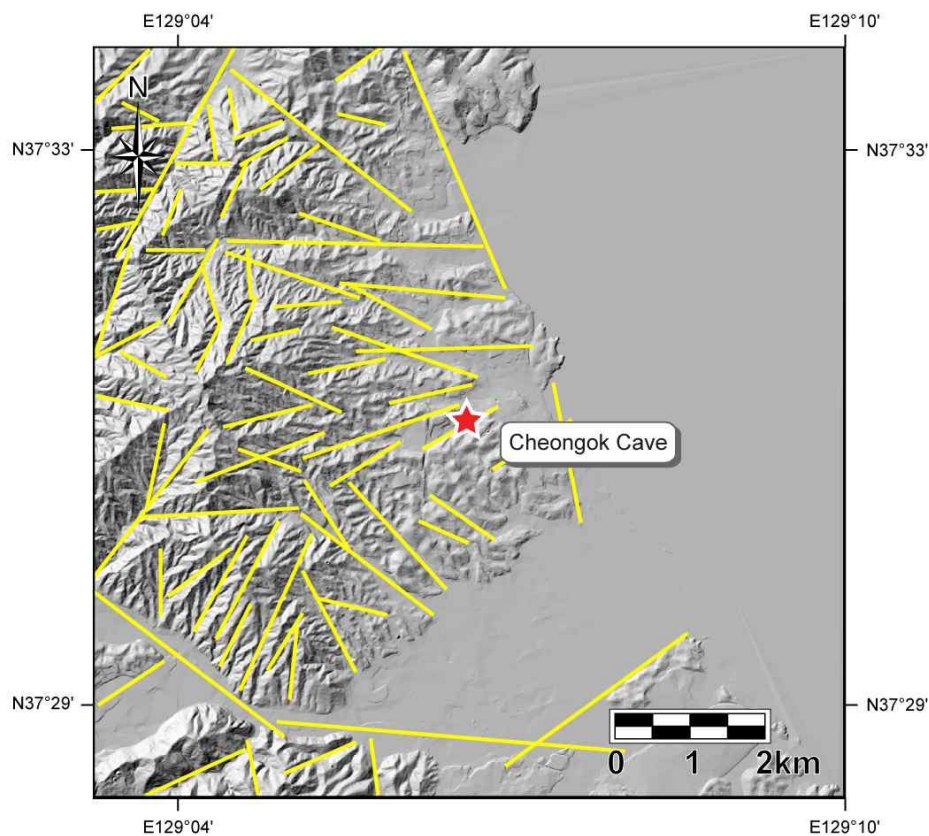


Fig. 3.8.2. Lineaments around Cheongok Cave.

용연동굴 주변 광역 선구조는 총 74개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선구조의 방향성만을 분석한 결과, N20~30°E 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, N50~60°E와 N70~80°E, N70~80°W의 방향성이 부수

적으로 나타나고 있다(Fig. 3.8.3).

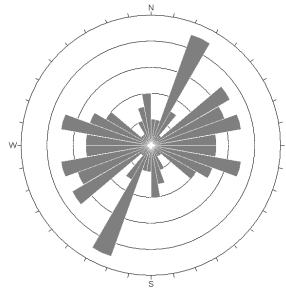


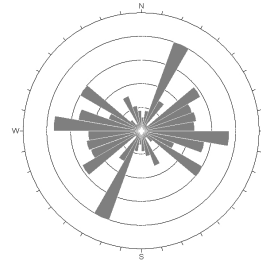
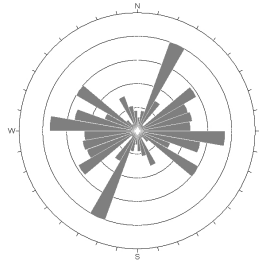
Fig. 3.8.3. Orientation analysis of lineaments around Cheongok Cave.

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 N20~30°E 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, 방향성 분석에서는 부각되지 않은 N80~90°W의 방향성이 우세한 것으로 나타나고 있다. 또한, 방향성 분석과 동일하게 N50~60°E, N50~60°W의 방향성이 부수적으로 분포하는 것으로 나타났다.

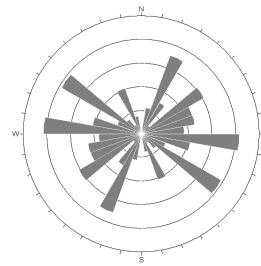
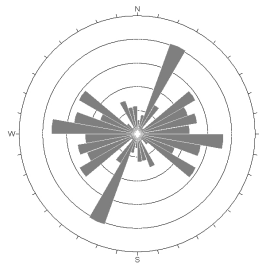
이러한 특징은 N80~90°W의 방향성이 방향성 개수에 대한 분포는 적지만 연장성은 우수한 특징을 보이기 때문으로 해석된다.

3.8.3. 지질특성

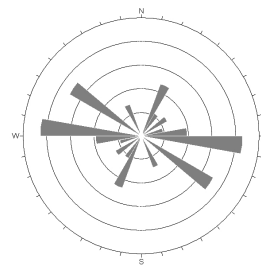
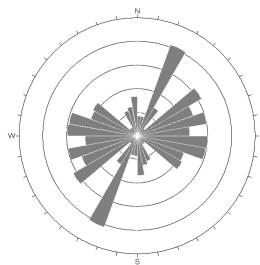
국립지질조사소(1962)에 의하면 천곡동굴 주변은 하부에서부터 선캠브리아기의 태백산동, 캄브리아기의 풍춘석회암층, 원평층, 석병산석회암층이 정합적 관계를 이루며 분포하는 것으로 분석하고 있다. 이 위에 정합관계를 이루고 있는 상부석탄기의 홍점통, 폐름기의 사동통, 트라이아스기의 고방산통이 석병산석회암층을 부정합관계로 덮고 있다(Fig. 3.8.4).



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.8.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Cheongok Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

천곡동굴이 위치하는 지층은 풍촌석회암층으로 설명하고 있다. 풍촌석회암층에 위치한 천곡동굴 동측에는 시대미상의 편상화강암이 나타나고 있는데 이는 상부 퇴적층이 관찰되지 않고 바로 나타나는 것으로 보아 단층 및 습곡 또는 관입의 영향으로 판단된다.

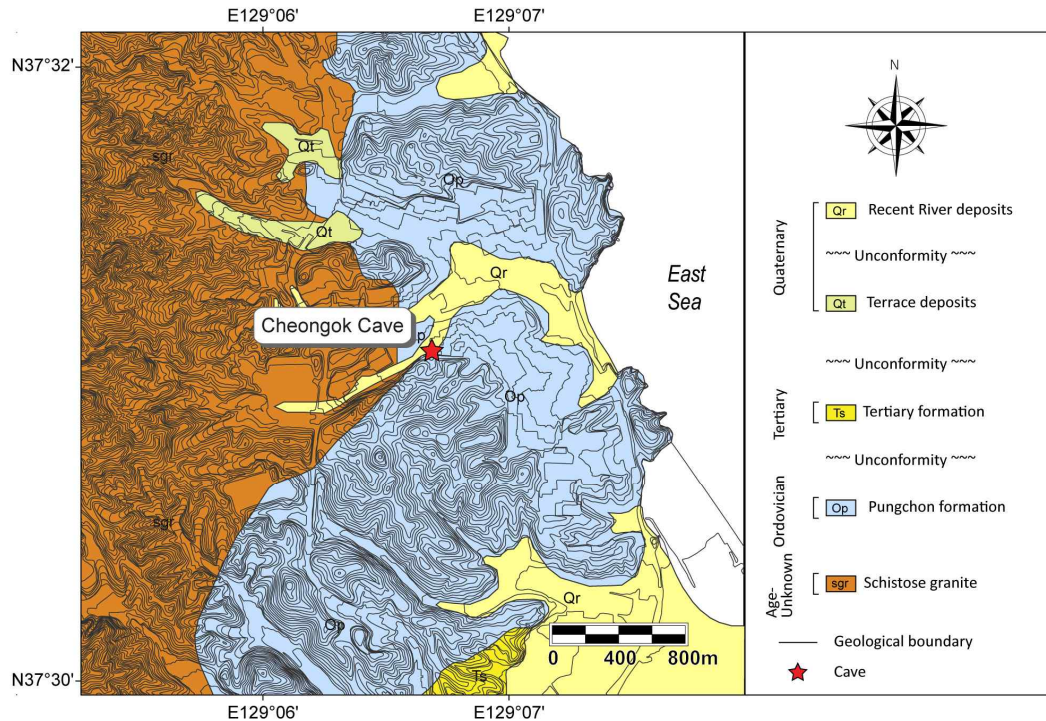


Fig. 3.8.5. Geologic map of Cheongok Cave(by Korea Geological Survey[1962]).

정창희(1991)의 연구에서도 국립지질조사소(1962)의 지질계통과 유사한 해석을 하고 있으며, 천곡동굴의 풍촌석회암층은 심한 습곡작용을 받아 일정한 주향과 경사를 보이지 않는 특징이 있다고 한다. 일부 지역에서는 층리의 경사가 90°로 수직하다고 한다.

또한, 통상적인 풍촌석회암층의 층후는 200 m내외이지만 천곡동굴의 층후는 명확하지 않다고 한다.

정창희(1991)는 국립지질조사소(1962)에서 제시한 층서는 인정하면서 천동동굴 주변의 상세지질은 다르게 해석하고 있다. 풍촌석회암층 중 상부회암층과 회색석회암층, 하부회암층의 형태를 보이고 있으며 천곡

동굴이 주로 발달하는 층은 중부의 회색석회암층으로 해석하고 있다. 천곡동굴의 입구는 하부고회암층과 정합관계를 이루는 지점에 위치한다고 보고하고 있다. 또한, 풍춘석회암층 서측의 암층은 편마질화강암으로 해석하고 있다.

홍충렬(1995)은 천곡동굴의 지질을 조선누층군의 중부화 평안누층군이 위치하는 것으로만 제시하고 있으며 편마상화강암과 우백질화강암이 관입하는 형태를 보인다고 발표하였다.

우경식과 이무열(2006)에 의하면 천곡동굴 주변은 카르스트지형이 발달한 지역으로 하부고생대 퇴적암인 조선누층군 대기층 석회암이 분포하는 것으로 해석하고 있다. 암회색의 결정질 석회암이며 괴상의 형태를 띠지만, 부분적으로 층리를 보이며, 일부 이질 성분이 내포된 것으로 보고하고 있다.

최영성(2009)의 연구에 의하면 천곡동굴 지역의 기반암을 캄브리아기의 풍춘석회암층으로 설명하고 있으며 이는 다른 지역의 대기석회암층으로 대비되는 특징을 지니고 있는 것으로 보고 있다. 주로 미정질 회색 내지는 담회색의 석회암으로 괴상으로 존재하거나 층리가 잘 발달되지 않은 특성이 있다고 한다.

기존 지질자료를 종합할 때, 천곡동굴 주변의 지층은 과거 풍춘석회암층으로 분류되었으나 현재는 대기석회암층으로 분류된 지역으로 괴상의 형태를 보이는 것으로 판단되며, 이러한 특징은 현장에서도 확인되고 있다.

3.8.4. 동굴특성

홍현철(1991)의 연구에 의하면 천곡동굴 상부에 산재된 돌리네와 우발레에 스며든 지표수가 동굴을 형성하면서 지층의 주향과 층서면을 따라

지하수류가 흘러나간 수로가 형성되었으며 이후 수로가 확장되며 동굴로 형성된 것으로 보고 있다.

유영준과 이영화(1996)에 의하면 천곡동굴은 동굴과 지표에 돌리네와 우발라가 같이 산재하는 지역으로 천곡동굴은 수평동굴로 분석하고 있다. 천정에서 투수점적 현상(지표수가 유입되어 동굴로 떨어지는 현상)이 활발한 특성을 보이고 있으며 동굴퇴적물이 많이 발달하고 있다고 한다.

우경식과 이무열(2006)에 의하면 천곡동굴 주변에 돌리네가 관찰되고 있는데 이는 용식돌리네(solutional doline)로 해석하고 있으며 돌리네의 직격은 12~110 m로 매우 다양하다고 보고하고 있다. 천곡동굴의 총 연장은 612m로 돌리네의 발달방향과 같은 북동-남서 방향이며 대부분 단일통로가 주통로를 이루고 있는 수평굴로 보고 하고 있다.

최영성(2009)은 천곡동굴의 경우 지표면에서 절리면으로 침투한 지하수로 충전된 포화수대에서 동굴수의 외부 배출이 이루어진 후 순화수대로 전환되는 과정을 보이고 있다고 보고하고 있다. 총 길이를 1.4km로 개방부간이 700m로 확인되지 않은 지굴이 상당히 분포하는 것으로 예상하고 있다.

홍현철(1991)에 의해 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.8.6). 추출된 방향성은 총 31개로 방향성을 분석하였다.

천곡동굴 내 발달 방향성만을 분석한 결과 N0~10°W이 매우 우세한 방향성을 보이며, N50~60°E과 N0~10°E 방향이 상대적으로 미약하지만 부수적인 방향성을 보이는 것으로 해석되었다(Fig. 3.8.7).

방향성에 연장성을 이용해 가중치가 적용된 해석을 위해 기초 내용은 Table 3.8.1과 같다.

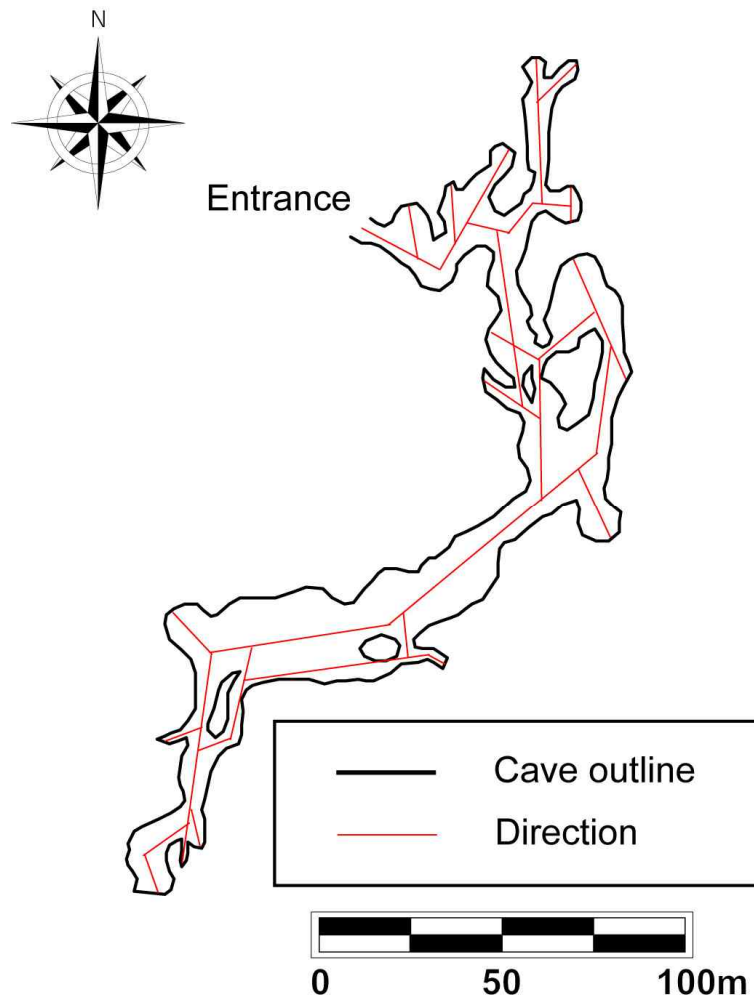


Fig. 3.8.6. Orientation in Cheongok Cave(based on Hong[1991]).

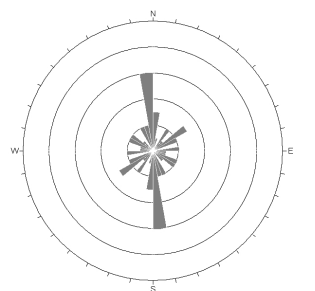


Fig. 3.8.7. Orientation analysis of in Cheongok Cave.

Table 3.8.1. Weighting for persistence in Cheongok Cave.

		Details			
Total orientation		31			
Average span(m)		7.88			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	30	15	11	5
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	23	18	12	6

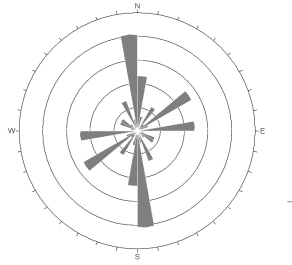
Fig. 3.8.8과 Fig. 3.8.9에서 보는 바와 같이 가장 우세한 방향성의 형태는 유사하지만, 이차적으로 나타나는 방향성에서는 다소 차이를 보이고 있다.

평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용하였을 경우, N0~10°W이 가장 우세한 방향성으로 분석되었고, 이차적으로 N50~60°E과 N0~10°E, N80~90°E 방향성이 나타나고 있다.

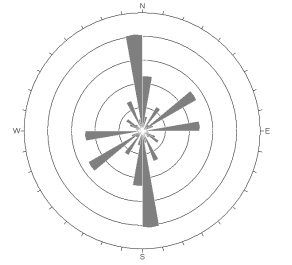
이에 반해, 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 해석에서는 N0~10°W 방향성 외에 N50~60°E 방향성은 두각되지 않고 N0~10°E, N80~90°E 방향성만 이차적으로 나타나고 있다.

분석된 방향성은 광역 선구조에서 나타난 주 방향성(N20~30°E)의 특징은 안 나타나고 이차적 방향성인 N50~60°E의 방향성과 유사한 형태를 보이고 있다.

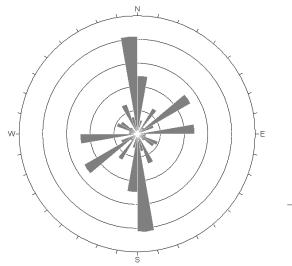
이는 천곡동굴의 발달에 있어 지구조적 영향성이 있더라도 그 영향성은 크지 않은 상태로 판단된다.



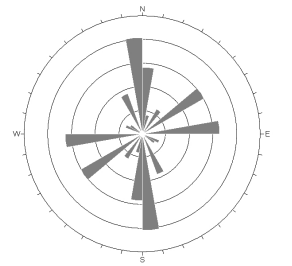
(a) including below criteria(1)



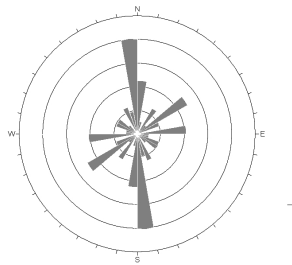
(b) excluding below criteria(1)



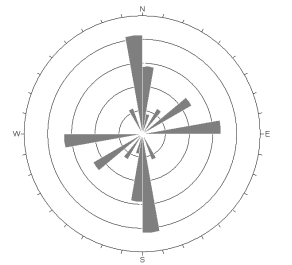
(c) including below criteria(2)



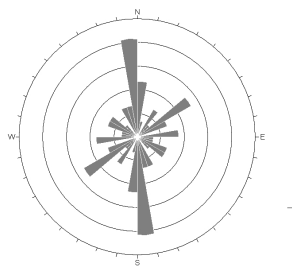
(d) excluding below criteria(2)



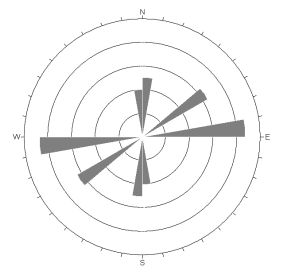
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



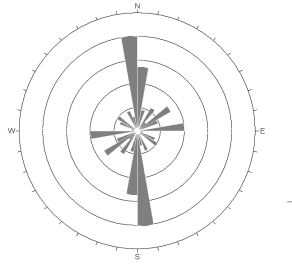
(g) including below criteria(5)



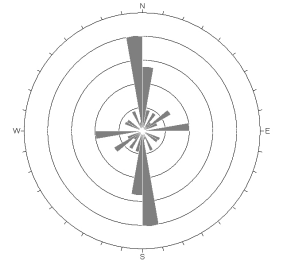
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.8.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Cheongok Cave.

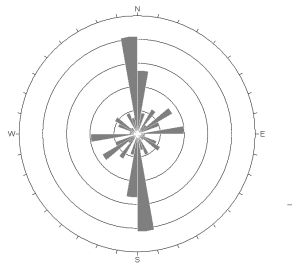
* Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio



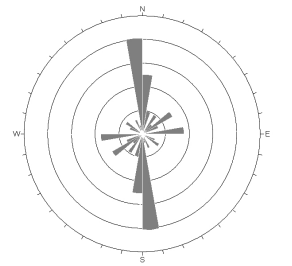
(a) including below criteria(1.5)



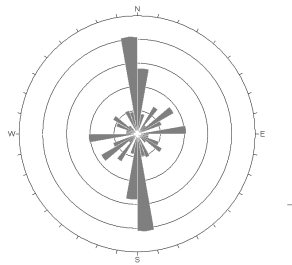
(b) excluding below criteria(1.5)



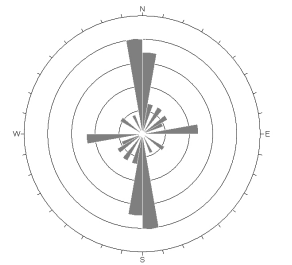
(c) including below criteria(2)



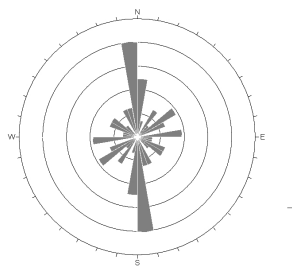
(d) excluding below criteria(2)



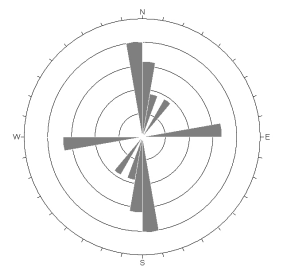
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.8.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Cheongok Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

3.8.5. 불연속면 특성 분석

천곡동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 천곡동굴 입구의 약 20 여m 상부 자연 사면 노두에 대해 스캔라인 조사를 수행하였다 (Fig. 3.8.10).

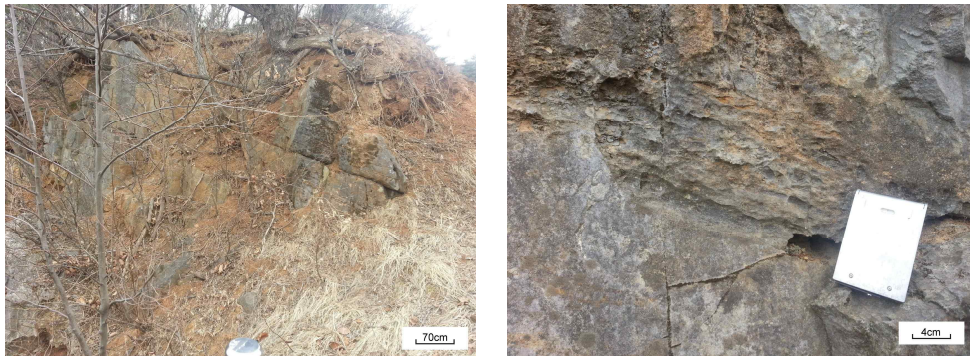


Fig. 3.8.10. Upper slope of Cheongok Cave Entrance.

천곡동굴은 입구에서 내부로 들어가기 위해서는 계단을 이용하여 약 30도의 경사로 진입하여야 한다. 입구의 안전성을 확보하기 위해 입구에서 약 5~6m 구간은 입구 보강이 이루어진 상태이다.

입구 좌측면과 우측면 모두 석회암 용식에 의해 많은 굴곡을 보이고 있으며 불연속면 측정이 용이하지 않은 관계로 천곡동굴 상부의 사면 중 노두에 대한 조사만 수행하였다.

3.8.5.1. 천곡동굴 입구 상부 사면

조사구간은 약 7m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 16개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 주 방향성으로 $N43^{\circ}W/16S^{\circ}W$ (set

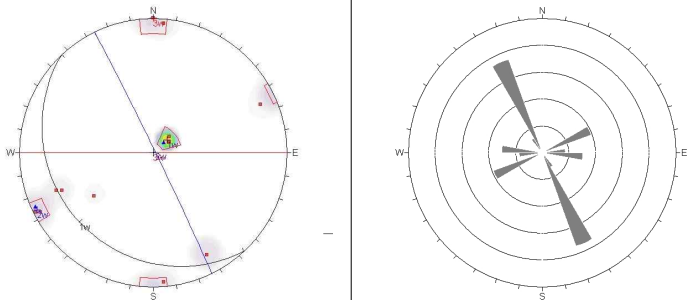
1)이 분석되었으며, N26°W/88°NE과 WE/90°NW의 방향성이 부수적으로 나타나고 있다(Table 3.8.2).

Set 1으로 분석된 방향성은 조사된 사면 내 석회암층의 층리방향으로 기존 지질조사의 풍춘석회암층의 지층방향과는 차이가 있다. 지층이 괴상이고 명확한 층리방향이 확인되고 있지 않고 있으며, 심한 습곡작용이 있는 지역이다(정창희, 1991). 따라서, 본 사면의 층리방향이 천곡동굴의 전체의 층리방향을 대표하고 있다고 판단하기는 어렵다. 천곡동굴의 입구가 경사로 되어있고 내부는 수평을 이루는 것으로 보아 습곡의 영향을 받은 절리면을 따라 공동이 형성되고 내부에서 완만한 형태를 이루는 층리를 따라 동굴의 확장이 있던 것으로 판단할 수 있다.

불연속면의 간격은 보통에서 넓은 정도(moderate~wide spacing)를 보이며, 연속성은 보통 정도(medium persistence)로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

Table 3.8.2. Discontinuities of Upper slope of Cheongok Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		7m	Trend/plunge	050/00
Number of Discontinuities		16		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)
		N43°W	N26°W	WE
		16S°W	88°NE	90°NW
Spacing (cm)	Mean	49.27	123.30	92.97
	S.D.	42.75	83.13	38.20
Persistence (m)	Mean	5.25	4.50	4.00
	S.D.	2.22	2.89	3.46
Roughness (0~20)	Mean	4.50	5.25	4.67
	S.D.	0.58	1.50	0.58
Aperture (mm)	Mean	1.25	1.50	2.00
	S.D.	0.50	0.58	1.00
Infilling		mainly sand or silty sand, partially open		
Seepage		mainly wet, partially dry		
Strength (MPa)		33.62	18.16	–

3.9. 화암동굴

3.9.1. 현장 개요

화암동굴은 강원도 정선군 정선읍 화암면 화암리에 위치하며 1922년부터 1945년까지 금을 채광하던 천포광산 개발당시 석회동굴이 있음을 확인하였다(Fig. 3.9.1).

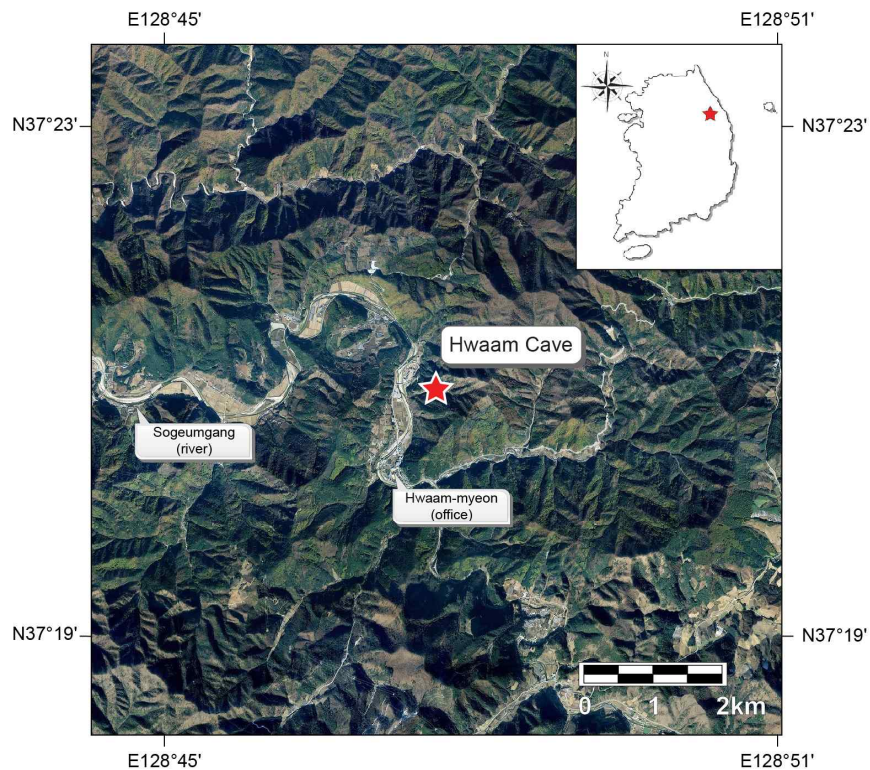


Fig. 3.9.1. Location map of Hwaam Cave(based on Website map.naver.com).

금광산과 석회동굴이 매우 인접하여 위치하고 있다는 특이성을 갖고 있는 화암동굴은 1980년 2월 강원도 시도기념물 제 33호로 지정되었으

며, 1993년부터 일반인에게 공개되고 있다.

해발 약 550m에 위치한 화암동굴은 각희산(1,079m) 남서측에 위치하고 있으며 화암동굴 서측에는 소금강이 흐르고 있다.

3.9.2. 광역 선구조

화암동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.9.2).

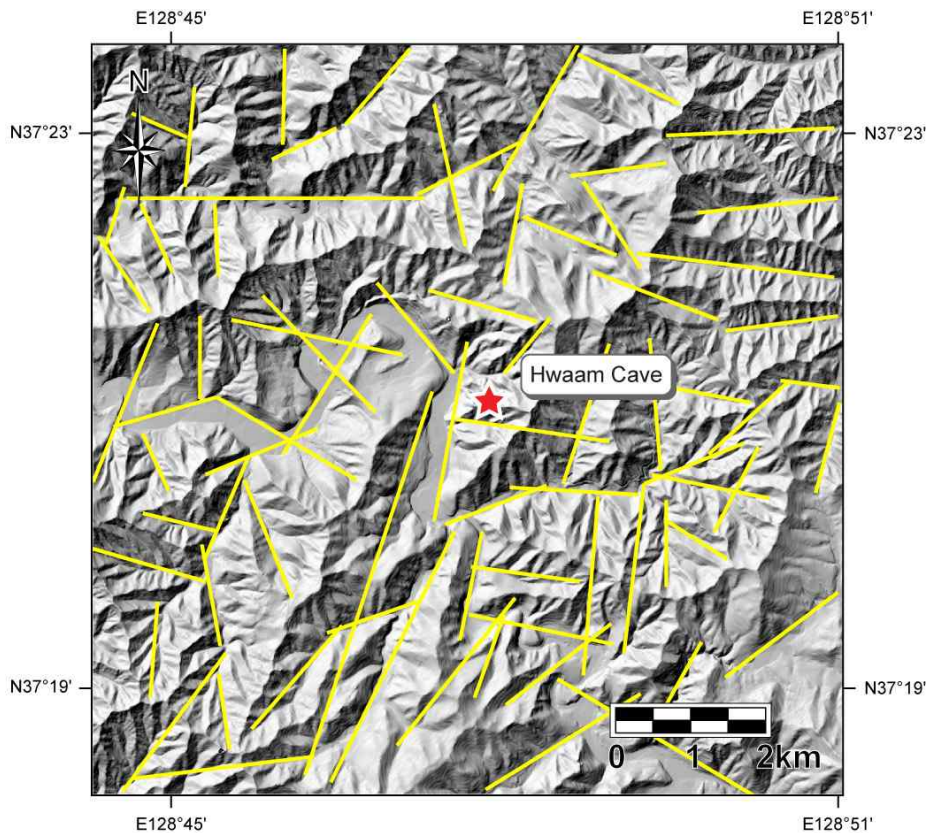


Fig. 3.9.2. Lineaments around Hwaam Cave.

화암동굴 주변 광역 선구조는 총 75개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선구조의 방향성만을 분석한 결과, N0~30°E 방향이 가장 우세한 것으로

분석되었으며, 이차적으로 N70~90°W의 방향성도 나타나고 있다(Fig. 3.9.3).

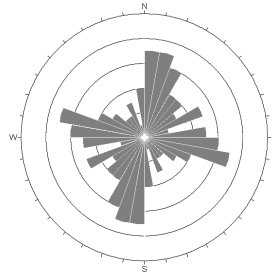


Fig. 3.9.3. Orientation analysis of lineaments around Hwaam Cave.

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용하고 수행한 해석에서도 동일한 방향성이 우세하게 나타나는 것으로 분석되었다(Fig. 3.9.4).

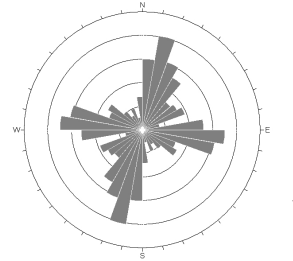
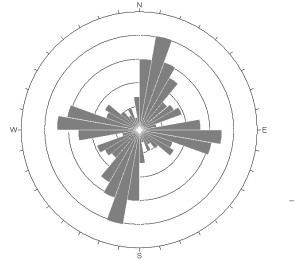
이 두 방향성은 화암동굴 주변에 위치하는 선구조의 방향성 과도 일치하는 것으로 두 방향성이 화암동굴 내 함금은석영맥이나 석회동굴형성에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

3.9.3. 지질특성

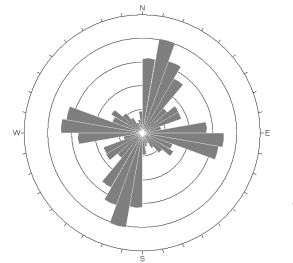
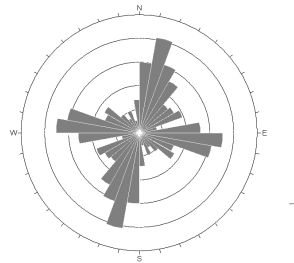
국립지질조사소(1962)에 의하면 화암동굴 주변은 하부에서부터 선캠브리아기의 태백산동, 캄브리아기의 장산규암층, 묘봉층, 풍촌석회암층, 화절층, 오르도비스기의 동점규암층, 두무동층, 막골석회암층, 정선석회암층이 정합적 관계를 이루며 분포하는 것으로 분석하고 있다. 이 위에 정합관계를 이루고 있는 상부석탄기의 홍점통, 사동통이 정선석회암층과 부정합관계를 이루고 있다(Fig. 3.9.5).

화암동굴이 위치하는 지층은 풍촌석회암층으로 화암동굴 서측의 소금강 하부에 남북 내지 북북동-남남서 방향의 역단층이 위치하는 것으로

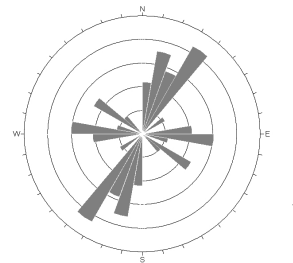
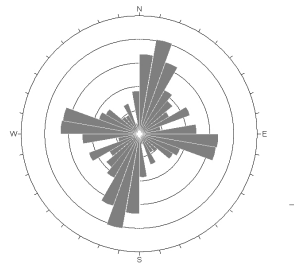
보고하고 있다.



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.9.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Hwaam Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

특히 소금강을 중심으로 화암동굴이 위치하는 동측은 동쪽 경사를, 서측은 서쪽 경사를 보이는 지층면을 보이는 것으로 분석하고 있다. 화암

동굴 남측에도 남북 내지 북북동-남남서 방향의 단층이 국부적으로 다수 분포하는 것으로 해석하고 있다.

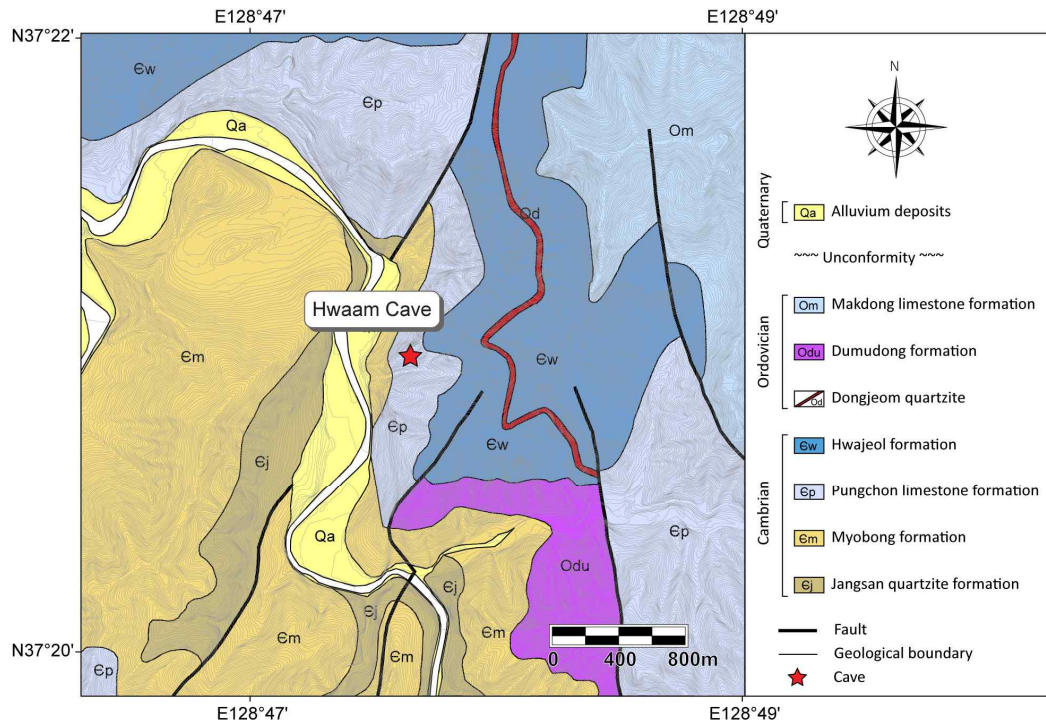


Fig. 3.9.5. Geologic map of Hwaam Cave(by Korea Geological Survey[1962]).

홍현철과 변대준(1995), 홍충렬(1995)은 화암동굴을 형성하는 지층을 고생대 캄브리아기의 대석회암통의 고성석회암에 속하는 정선석회암층으로 보고하고 있다. 또한, 동굴 주변에 암녹색의 셰일인 묘봉층이 분포하며 동굴 전방 산지는 막골석회암층으로, 동굴 입구 주변을 풍촌석회암층으로 설명하고 있다. 화암동굴은 단층구조선을 따라 지하공동이 형성되고 발달된 것으로 해석하고 있다.

정소걸 외(2005)에 의하면 화암동굴 주변은 조선누층군의 풍촌석회암

층으로 중생대 쥐라기 및 백악기의 화성활동에 의해 관입한 화강암과 맥들이 소규모 분포한다고 보고하고 있다. 특히 금광은 관입층 주변에 마그마에 의해 유래된 금속광화대가 형성되면서 발달하였다고 한다. 또한, 화암굴 주변에 북동-남서 방향의 단층이 위치하고 동측에는 북북서-남남동 방향의 단층이 위치하고 있다고 제시하고 있다.

풍촌석회암층은 대기석회암층으로 대비되는 지층이므로(최영성, 2009), 화암동굴 주변의 지층은 대기석회암층으로 판단하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3.9.4. 동굴특성

홍현철과 변대준(1995)은 화암동굴은 방해석질이 좋은 2차생성물을 내포하고 있으며 대석순과 대석주의 경우 대규모인 형태를 보인다고 보고하고 있다. 그러나 동굴 형성과정에서 낙반이 많이 발생하여 광장동굴이 형성되었기 때문에 2차생성물의 발달이 다른 자연 석회동굴에 비해 미약한 편이라고 하였다.

권동희와 유영준(1996)의 보고에 의하면 화암동굴의 경우 금광개발 이전에 동굴은 이미 있었기 때문에 광산개발로 인해 자연 석회동굴의 훼손이 있었음을 지적하고 있다. 큰 원인으로 폭음과 진동 등의 영향으로 낙반이 많이 발생하고 이로 인해 동굴은 짧은 시간 안에 더 넓은 형태로 확장된 것으로 보고 있다.

정소걸 외(2005)는 화암동굴 내 안정성 평가를 실시하였다. 석회공동 구간에 대해 안정성 분석을 수행한 결과 켄터필의 위험성이 있는 상태이며 동굴내로 안정보강 장비의 진입이 어려우므로 위험지역으로부터 관람로를 변경하는 것이 좋다는 의견을 제시하였다.

화암동굴은 다른 지역의 동굴과 달리 천포광산 가행 중 발견된 석회동굴이다. 따라서 자연적으로 석회동굴에 해당되는 구역은 대자연의 신비 구간으로 큰 광장을 이루는 지역이다. 발달 연장성에 대해서는 추가적인 탐사와 연구가 필요한 지역이다(Fig. 3.9.6).

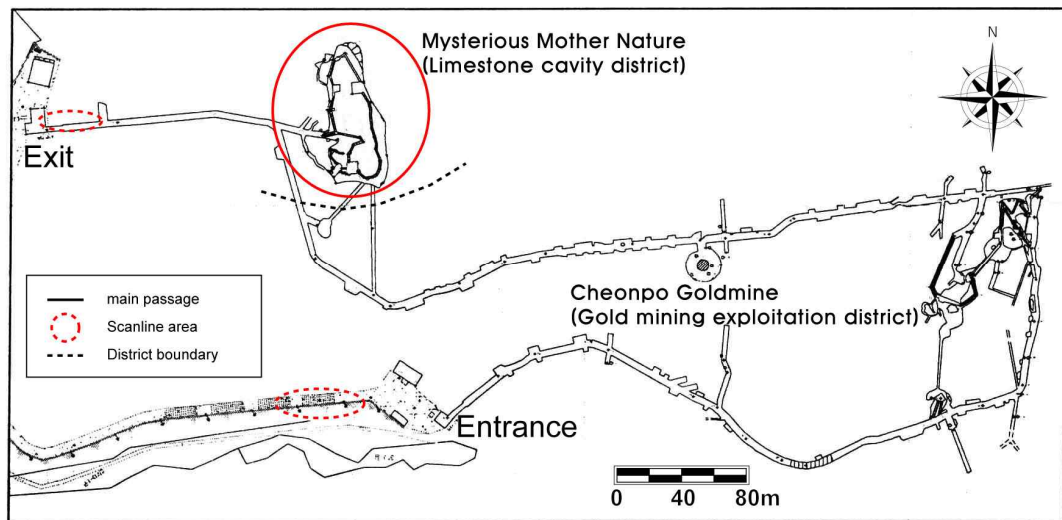


Fig. 3.9.6. Hwaam Cave map(based on Jeong *et. al.*[2005]).

3.9.5. 불연속면 특성 분석

화암동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 화암동굴 입구 부근의 인공 절취사면과 출구의 좌측면에 대해 스캔라인 조사를 수행하였다(Fig. 3.9.7, Fig. 3.9.8).

3.9.5.1. 화암동굴 입구 주변 사면

조사구간은 약 23.5m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 324개이다.



Fig. 3.9.7. Slope around Hwaam Cave Entrance.



Fig. 3.9.8. Left lateral of Hwaam Cave Exit.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 $N50^{\circ}W/85^{\circ}SW$ (set 1), $N40^{\circ}W/14^{\circ}NE$ (set 2), $N66^{\circ}W/84^{\circ}SW$ (set 3), $N41^{\circ}E/87^{\circ}NW$ (set 4), $N15^{\circ}E/82^{\circ}NW$ (set 5) 등이 혼재되어 나타나고 있는 것으로 분석되었다(Table 3.9.1).

전체적으로 암적색 내지는 암회색, 담회색의 색상을 보이는 암질로 괴상의 석회암으로 판단된다. 확인된 불연속면의 경우 대부분 절리면의 형태를 보이고 있으며 set 1과 set 3는 조사된 사면 내 주요 절리면으로 스캔라인 구간별로 경사각의 변화가 있는 상태로 확인되었다. 대부분의 불연속면이 고각의 패턴을 보이고 있으며 $N40^{\circ}W/14^{\circ}NE$ (set 2)는 이를

사교하는 형태를 보이고 있다.

분석된 방향성은 광역 선구조에서 나타난 $N0\sim30^{\circ}E$, $N70\sim90^{\circ}W$ 의 방향성이나 국립지질조사소(1962)의 지층면의 경사방향과도 다소 차이를 보이고 있다. 이는 해당 지층이 괴상의 패턴을 보이고 있고 해당지역에 습곡 및 단층 작용에 의해 고각의 절리면이 형성된 것으로 판단되며, 사면 내 절리면의 경사각의 변화를 통해서도 이를 추정할 수 있다고 판단된다.

불연속면의 간격은 불연속면 군집에 따라 매우 조밀에서 보통 정도(very close~moderate spacing)를 보이며, 연속성은 보통 정도(medium persistence)로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

3.9.5.2. 화암동굴 출구 좌측

조사구간은 약 9.5m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 132개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 주 방향성으로 $N11^{\circ}E/15^{\circ}NW$ (set 1)이 분석되었으며, $N33^{\circ}W/88^{\circ}SW$ 과 $N55^{\circ}W/78^{\circ}SW$ 의 방향성이 부수적으로 나타나고 있다. Set 1이 조사된 좌측면내 석회암의 주요 층리면으로 set 2와 set 3의 절리면이 이를 사교하는 형태를 보이고 있다(Table 3.9.2).

좌측면의 불연속면 특성은 입구 주변의 사면의 불연속면의 형태와 다소 차이를 보이고 있다. 이는 단층 및 습곡 등 지구조적 영향에 의해 불연속면의 발달형태가 상이하게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 3.9.1. Discontinuities of slope around Hwaam Cave Entrance.

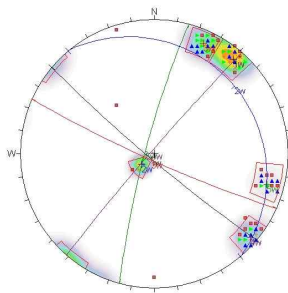
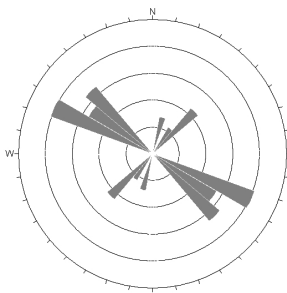
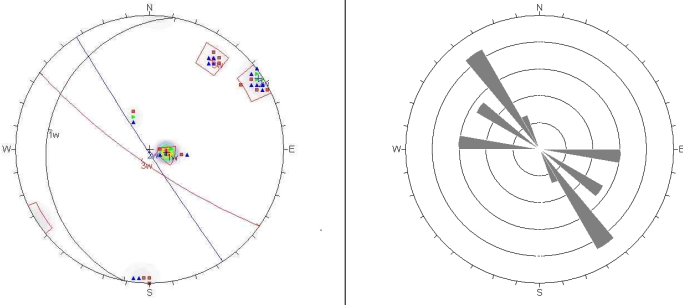
		Details					
Scanline length		23.5m		Trend/plunge		260/10	
Number of Discontinuities		324					
Stereonet							
Set		Set 1 (joint)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)	Set 4 (bedding)	Set 5 (bedding)	
		N50°W	N40°W	N66°W	N41°E	N15°E	
		85°SW	14°NE	84°SW	87°NW	82°NW	
Spacing (cm)	Mean	12.68	3.84	12.07	21.87	23.27	
	S.D.	1.45	1.03	1.45	50.37	7.62	
Persistence (m)	Mean	6.90	8.45	6.73	8.95	2.09	
	S.D.	1.28	1.05	1.75	1.38	1.28	
Roughness (0~20)	Mean	3.07	3.16	2.90	3.15	2.88	
	S.D.	0.72	0.66	0.71	0.73	0.66	
Aperture (mm)	Mean	1.47	1.51	1.50	1.53	1.47	
	S.D.	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	
Infilling		mainly sand or silty sand, partially open					
Seepage		mainly wet, partially dry					
Strength (MPa)		26.59	29.2	–	–	–	

Table 3.9.2. Discontinuities of Left lateral of Hwaam Cave Exit.

		Details		
Scanline length		9.5m	Trend/plunge	095/00
Number of Discontinuities		132		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)
		N11°E	N33°W	N55°W
		15°NW	88°SW	78°SW
Spacing (cm)	Mean	4.02	21.85	74.29
	S.D.	0.93	4.42	12.30
Persistence (m)	Mean	3.60	3.10	3.33
	S.D.	0.63	1.15	0.98
Roughness (0~20)	Mean	2.53	2.45	2.50
	S.D.	0.50	0.50	0.52
Aperture (mm)	Mean	0.72	0.25	0.58
	S.D.	0.58	0.44	0.79
Infilling		mainly open, partially silt		
Seepage		mainly wet		
Strength (MPa)		37.71	39.37	–

또한, 분석된 방향성 중 set 1은 광역 선구조에서 나타난 $N0\sim30^{\circ}E$ 의 방향성에 해당하는 방향성이며, 국립지질조사소(1962)의 지층면의 경사 방향과도 유사한 것으로 보인다. 출구부의 불연속면 발달특성이 인접한 석회동굴 광장지역과 유사할 것으로 판단되지만 동굴 형성에 어떠한 영향을 미쳤는지를 판단하기는 부족한 것으로 판단된다.

불연속면의 간격은 불연속면 군집에 따라 매우 조밀에서 넓은 정도 (very close~wide spacing)를 보이며, 연속성은 보통 정도 (medium persistence)로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

3.10. 환선동굴

3.10.1. 현장 개요

환선동굴은 강원도 삼척시 신기면 대이리에 위치하며 총 연장은 약 6.2km로 아시아 최대의 규모로 알려진 자연 석회동굴이다.

환선동굴은 태백산맥의 일부인 덕향산(1,077m) 북측에 위치하고 있고 주변이 1,000m 내외의 산지로 둘러쌓여 있는 계곡 내 물바우골에 위치한다(Fig. 3.10.1).

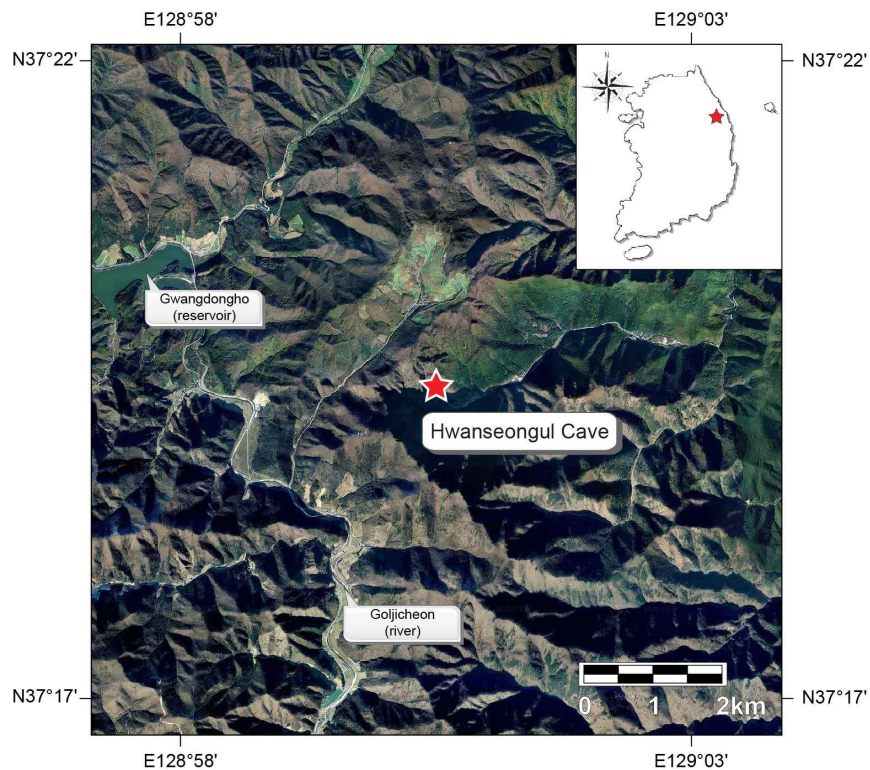


Fig. 3.10.1. Location map of Hwanseongul Cave(based on Website map.naver.com).

동굴 주변의 경사가 약 20~40도의 급한 경사로 되어 있으며 동굴 남측에는 오십천의 발원이 되는 하천이 서쪽에서 동쪽으로 흐르는 양상을 보이고 있다.

환선동굴 주변은 거대한 석회동굴 지대로 대금굴, 관음굴, 양터목세굴, 덕발세굴, 제암풍혈, 큰재세굴 등 2008년까지 7개의 동굴이 발견되어 있으며, 이 지역은 대이리동굴지대로 1966년 6월 천연기념물 제178호로 지정되었다. 이후 효율적 관리과 개발을 위해 1996년 10월 국립공원으로 지정하였다.

환선동굴은 알려진 전체 구간 중 약 1.6km를 정비하여 1996년부터 일반인에게 공개하고 있다.

3.10.2. 광역 선구조

환선동굴의 주변의 광역적 선구조를 파악하기 위하여 동굴 입구 동서 남북 5km 구획(10km×10km)을 설정하여 분석을 수행하였다(Fig. 3.10.2).

환선동굴 주변 광역 선구조는 총 74개가 추출되었다. 이를 바탕으로 선구조의 방향성만을 분석한 결과, N80~90°W 방향이 가장 우세한 것으로 분석되었으며, N0~20°E와 N80~90°E, N60~80°W의 방향성이 부수적으로 나타난다(Fig. 3.10.3).

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 동일한 방향성이 우세하게 나타나는 것으로 분석되었다. 특징적으로 N40~50°E 방향성이 이차적이지만 새롭게 나타나고 있다.

동서방향과 남북방향의 선구조가 나타난 것은 환선동굴 주변에 산악지형 형성시 지구조적 영향을 미친 단층의 영향 때문으로 판단되며 해당 방향도 지구조적 방향성을 지시하는 것으로 판단된다.

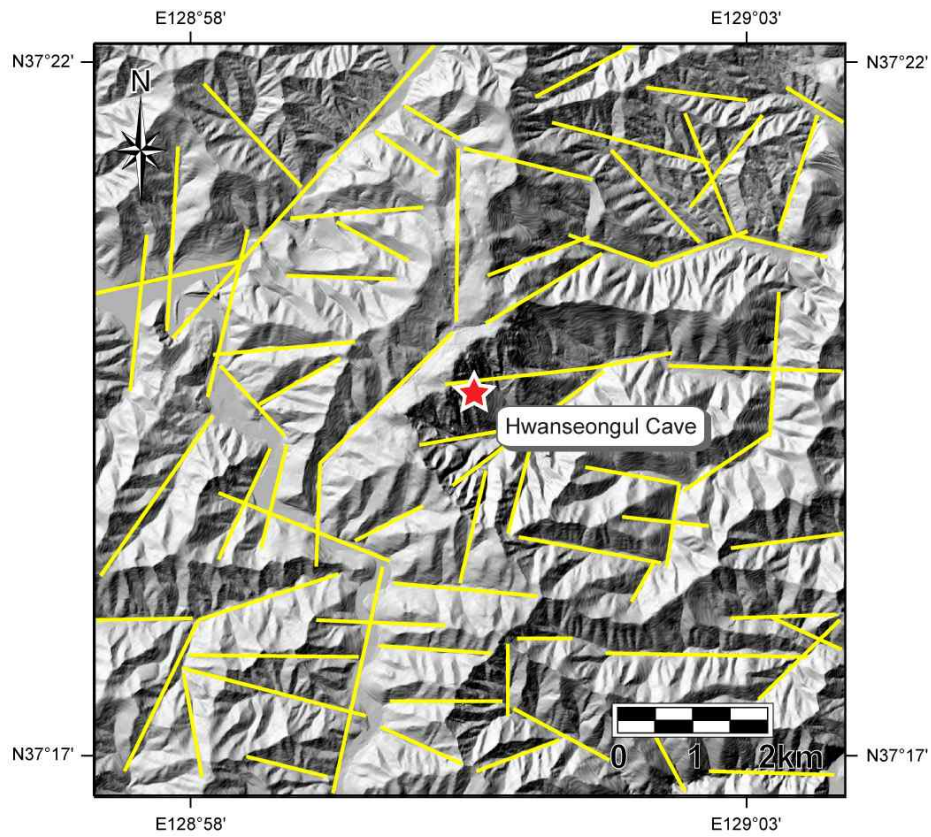


Fig. 3.10.2. Lineaments around Hwanseongul Cave.

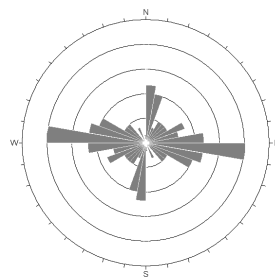
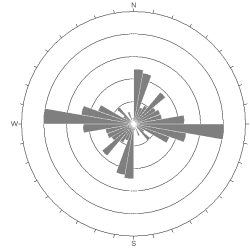
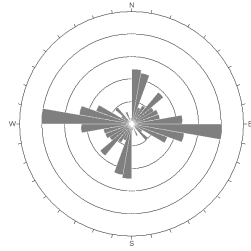
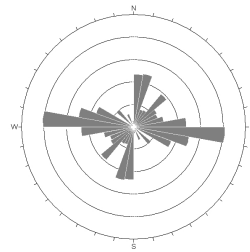
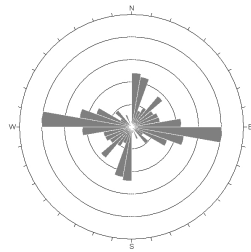


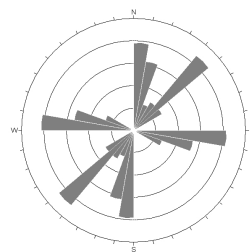
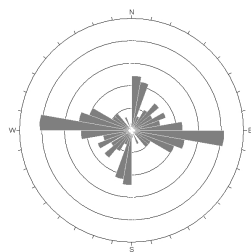
Fig. 3.10.3. Orientation analysis of lineaments around Hwanseongul Cave.



(a) including below criteria(500m) (b) excluding below criteria(500m)



(c) including below criteria(1km) (d) excluding below criteria(1km)



(e) including below criteria(2km) (f) excluding below criteria(2km)

Fig. 3.10.4. Orientation analysis using weighting for persistence of lineaments around Hwanseongul Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is 1/20, 1/10, 1/5 of width on lineament analysis area(10km×10km)*

3.10.3. 지질특성

국립지질조사소(1962)에 의하면 환선동굴 주변은 하부에서부터 캄브리아기의 장산규암층, 묘봉층, 풍춘석회암층, 화절층, 오르도비스기의 동점

규암층, 두무동층, 막골석회암층이 정합적 관계를 이루며 분포하는 것으로 분석하고 있다. 이 위에 정합관계를 이루고 있는 상부석탄기의 홍점통, 폐름기의 사동통, 트라이아스기의 고방산통과 녹암통이 막골석회암층과 부정합관계를 이루고 있다(Fig. 3.10.5).

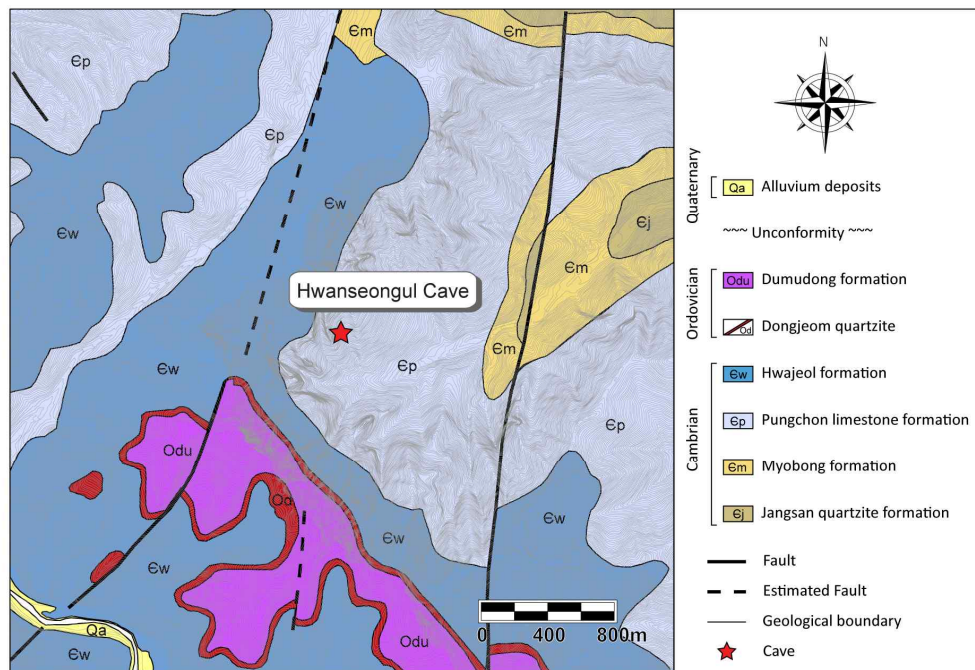


Fig. 3.10.5. Geologic map of Hwanseongul Cave(by Korea Geological Survey[1962]).

또한, 환선동굴이 위치하는 지층은 풍춘석회암층으로 환선동굴 서측에는 화절층이 동측에는 묘봉층이 나타나는데 인접 지역과의 층서적 불일치를 볼 때 환선동굴 주변에 단층의 영향이 있는 것으로 분석하고 있다. 단층의 방향은 남북 내지 북북동-남남서 방향으로 제시하고 있다.

정창희(1993)는 동굴이 위치한 지층을 풍춘석회암층(또는 대기석회암

층)으로 해석하고 있다. 주로 담회백색을 띠며 드물게 회색질 석회암층을 협재한다고 한다. 작은 방해석 입자로 된 재결정된 결정질 석회암이지만 암회색인 부분은 미결정질인 경우가 많으며, 국부적으로 돌라마이트질석회암도 분포한다고 한다.

또한, 급사습곡이나 과습곡으로 교란된 지층이 없이 지층의 경사가 주로 완만하며 두 개의 남북방향의 수직단층이 환선동굴 주변 지질에 영향을 준 것으로 해석하고 있다. 지층내 발달된 절리 역시 남북방향이 우세하다고 한다.

홍현철과 변대준(1995), 김성길(2003)의 연구에 의하면 환선동굴이 위치한 지층은 층후가 약 400m를 보이는 풍촌석회암층으로 설명하고 있다. 담색의 결정질 석회암으로 동굴의 연장이 대체로 남북방향을 보이는데 이는 남북방향의 단층이나 절리의 영향으로 나타난 것으로 해석하고 있다. 환선동굴은 풍촌석회암층 기저에서 약 150m되는 층군에 위치하는 것으로 보고 있다.

김련(2011)의 연구에 의하면 환선동굴 주변은 대기층으로 암회색, 유백색, 담홍색의 괴상 석회암으로 돌로마이트질 석회암과 석회질 세일로 구성되었다고 해석하고 있다. 전체적으로 결정질 석회암이며 동굴주변 최상부에는 우이드가 관찰되며 우이드 내부를 돌로마이트가 치환하는 특성을 보인다고 한다.

관련 자료를 종합하여 판단할 때, 환선동굴 주변은 대기석회암층으로 분류하여 해석하는 것이 적절하다.

3.10.4. 동굴특성

이소영(1998)에 의하면 환선굴은 복잡한 동굴류(洞窟流)에 의해 주굴의 층준이 달리하여 형성되며 지굴이 다수 발달하고 있는 특징을 설명하

고 있다. 또한, 구조상 경사복합굴로 주로 수평굴의 양상을 띠는다고 한다.

김련(2011)은 연구에서 환선동굴의 총 연장으로 약 8.5 km로 설명하며 석회암층의 층리면과 절리면들이 동굴 발달에 중요한 역할을 하고 있다고 보고하고 있다. 대부분의 동굴 발달은 주로 남북방향과 동서방향의 절리 방향성과 일치하고 있는 것으로 해석하고 있으며 일부 동서방향의 절리면 방향성을 제시하고 있다. 부분적으로 층리면을 따라 발달한 구간도 있는 것으로 해석하고 있다.

김련(2011)에 의해 제시된 동굴도를 바탕으로 동굴의 발달 방향성을 분석하였다(Fig. 3.10.6).

추출된 방향성 총 336개를 이용하여 환선동굴 내 방향성만을 분석한 결과 N0~20°E과 N0~10°W 방향이 매우 우세한 것으로 나타나고 있으며 N50~70°E, N80~90°E의 부수적 방향성은 있지만 상대적으로 작아 크게 나타나지 않고 있다(Fig. 3.10.7).

방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석을 위해 전체 폭의 평균을 산출한 결과, 약 5.41m인 것으로 분석되었으며 각 기준별 가중치 적용 개수는 Table 3.10.1과 같다.

Fig. 3.8.8과 Fig. 3.8.9에서 보는 바와 같이 방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서도 일부 이차적으로 나타나는 방향성이 일부 있지만 대체로 방향성 분석과 매우 유사한 형태를 보이고 있다. 이는 환선동굴의 발달은 남북방향이 매우 우세하고 전체 폭 대비뿐만 아니라, 개별 폭 대비에서도 연장성이 우수하기 때문으로 판단된다.

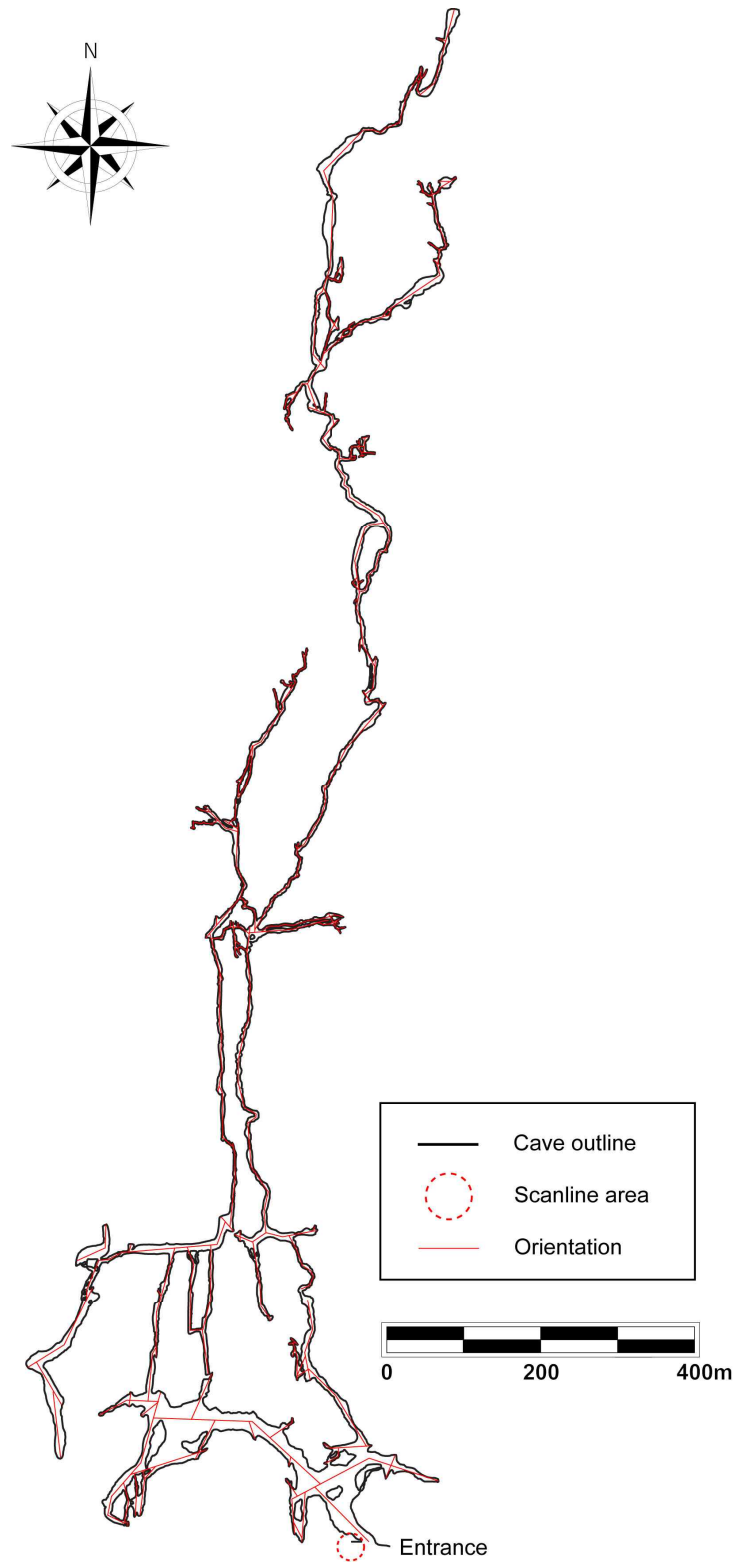


Fig. 3.10.6. Orientation in Hwanseongul Cave(based on Kim[2011]).

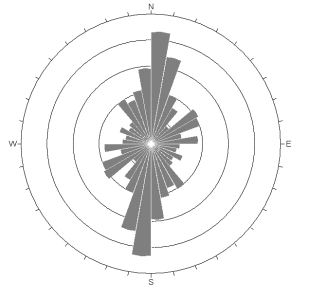
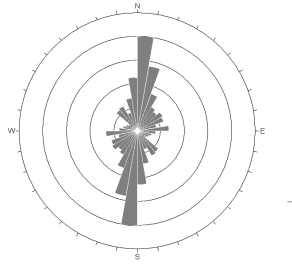


Fig. 3.10.7. Orientation analysis in Hwanseongul Cave.

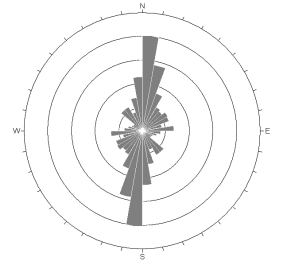
Table 3.10.1. Weighting for persistence in Hwanseongul Cave.

		Details			
Total orientation		336			
Average span(m)		5.41			
Average Span Ratio Method (ASRM)	Average span ratio	1	2	3	5
	Weighted number	311	225	174	101
Individual Development Ratio Method(IDRM)	Ratio of persistence on span	1.5	2	3	5
	Weighted number	314	280	219	109

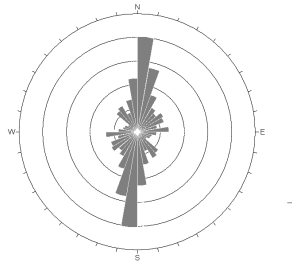
변대준(1995)과 김성길(2003), 김련(2011)의 연구에서 언급한 것처럼, 이러한 특성은 해당지역 주변에 남북 내지 북북동-남남서 방향의 단층이 인접하는데 이 방향의 영향이 큰 것으로 판단된다. 광역 선구조에서 나타난 동서방향의 선구조는 동굴의 발달 방향에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.



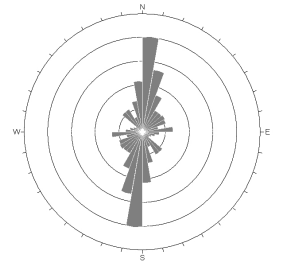
(a) including below criteria(1)



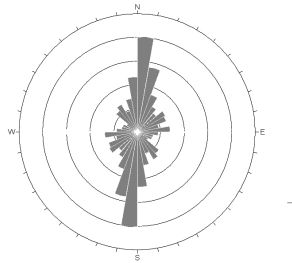
(b) excluding below criteria(1)



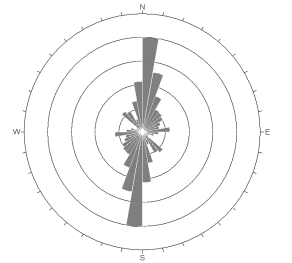
(c) including below criteria(2)



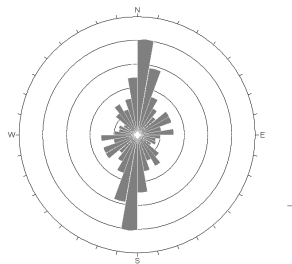
(d) excluding below criteria(2)



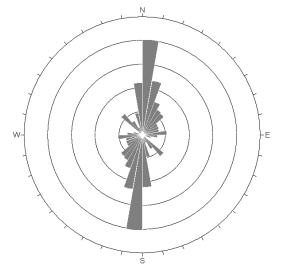
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



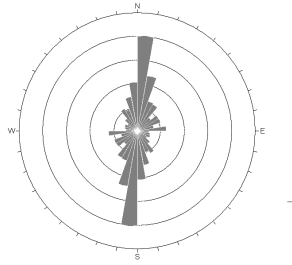
(g) including below criteria(5)



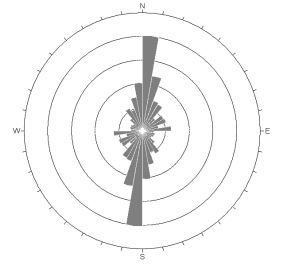
(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.10.8. Orientation analysis using weighting for persistence with Average Span Ratio Method(ASRM) in Hwanseongul Cave.

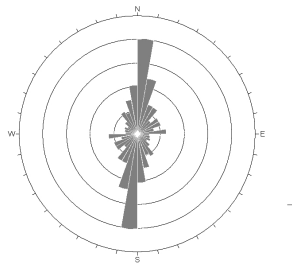
* Note : each number in the parenthesis of criteria is an average span ratio



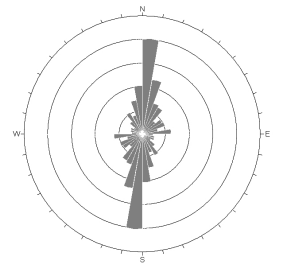
(a) including below criteria(1.5)



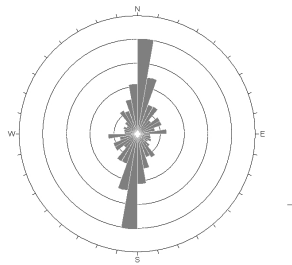
(b) excluding below criteria(1.5)



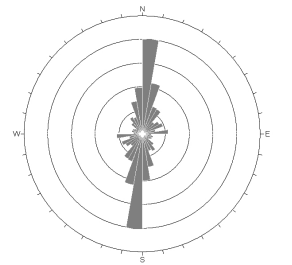
(c) including below criteria(2)



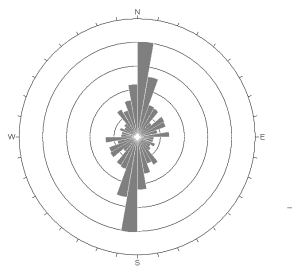
(d) excluding below criteria(2)



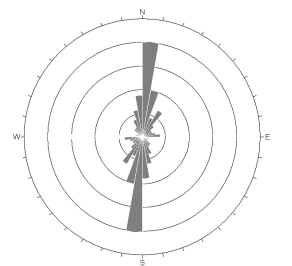
(e) including below criteria(3)



(f) excluding below criteria(3)



(g) including below criteria(5)



(h) excluding below criteria(5)

Fig. 3.10.9. Orientation analysis using weighting for persistence with Individual Development Ratio Method(IDRM) in Hwanseongul Cave.

** Note : each number in the parenthesis of criteria is a ratio of each persistence on span*

3.10.5. 불연속면 특성 분석

환선동굴 주변의 불연속면 발달 양상을 해석하기 위해 환선동굴 입구 내 좌측면 대해 스캔라인 조사를 수행하였다(Fig. 3.10.10).

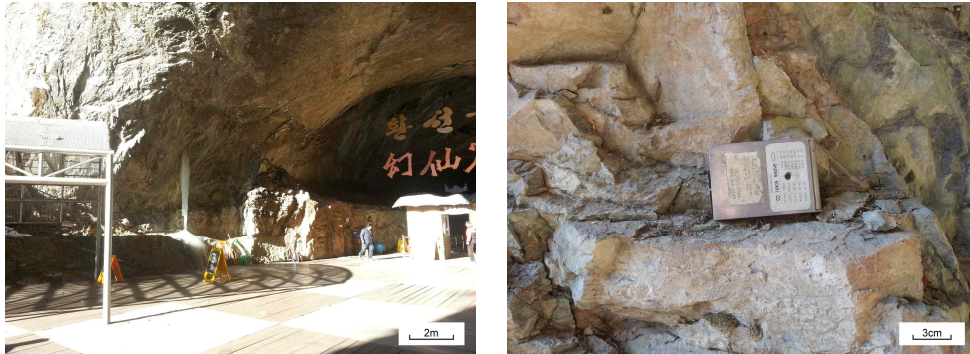


Fig. 3.10.10. Left lateral of Hwanseongul Cave Entrance.

환선동굴의 입구는 자연 상태로 많은 석회 용식작용이 관찰되고 있다. 일부 스폰지워크의 현상도 확인되고 있으며 출수의 흔적이 있는 것으로 확인되었다. 대부분의 불연속면의 틈은 열려있는 상태이며 일부 충전되어 있다.

좌측면과 우측면 모두 자연 상태이기는 하지만 우측면의 경우 석회석 용식작용에 의해 표면이 많이 변질되어 조사가 어려웠기에 좌측면에 대한 조사만 수행하였다.

3.10.5.1. 환선동굴 입구 좌측면

조사구간은 약 6m이며 스캔라인 조사를 통해 확인된 불연속면의 개수는 총 40개이다.

불연속면의 방향성을 조사한 결과 주 방향성으로 $N9^{\circ}W/90^{\circ}NE$ (set 1)

이 분석되었으며, N72°W/18°NE과 N2°E/74°NW의 방향성이 부수적으로 나타나고 있다(Table 3.10.2).

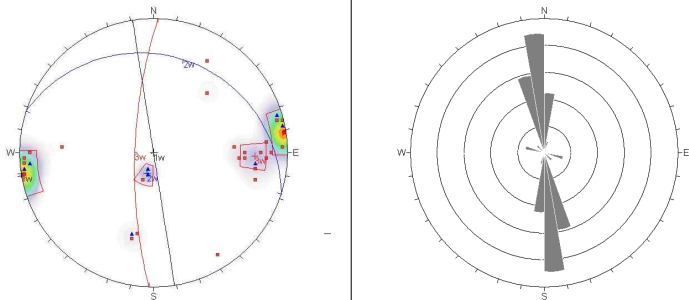
전체적으로 남북방향의 절리면과 층리면이 혼재되어 분포하는 특징을 보이는 것으로 분석되었으며, 일부 저각의 절리면의 분포를 확인할 수 있다.

이러한 방향성은 남북방향의 단층 영향이 크기 때문으로 판단되며 동굴의 발달 방향과도 연관성이 큰 것으로 해석된다.

불연속면의 간격은 불연속면의 군집에 따라 매우 조밀에서 보통 정도(very close~moderate spacing)를 보이며, 연속성은 보통 정도(medium persistence)로 분석되었다.

거칠기는 주로 평면형(planar)에 해당되며 틈은 틈새형(gapped features)의 형태로 열린(open) 상태로 분석되었다.

Table 3.10.2. Discontinuities of Left lateral of Hwanseongul Cave Entrance.

		Details		
Scanline length		6m	Trend/plunge	155/00
Number of Discontinuities		40		
Stereonet				
Set		Set 1 (bedding)	Set 2 (joint)	Set 3 (joint)
		N9°W	N72°W	N2°E
		90°NE	18°NE	74°NW
Spacing (cm)	Mean	39.25	5.74	36.08
	S.D.	89.10	6.50	46.81
Persistence (m)	Mean	3.73	3.20	4.13
	S.D.	0.96	0.45	0.83
Roughness (0~20)	Mean	6.20	4.40	6.75
	S.D.	2.31	2.19	1.04
Aperture (mm)	Mean	2.80	2.00	3.13
	S.D.	1.97	0.71	2.80
Infilling		mainly open, partially silty sand and sand		
Seepage		mainly wet including the trace of leakage, partially dry		
Strength (MPa)		17.65	14.93	–

4. 석회동굴 주변 방향성과 지질공학적 특성 분석

석회암이 넓게 분포하고 있는 지역에 대한 도로, 철도, 터널 등 국가 기간 산업물의 건설·시공계획에 있어 석회 공동이나 돌리네와 같은 카르스트 지형의 특성을 미리 파악하고 조치하는 것은 매우 중요한 일이다.

돌리네와 같이 지형의 변화가 예측되는 지역의 경우 주변의 위험성을 미연에 방지할 수 있고 단계적 접근이 가능하지만 석회공동이나 석회동굴의 경우 그 형태가 노출되어 있지 않기에 발견시 예측 및 대응이 매우 어렵다.

석회동굴의 경우 위치와 크기, 동굴의 발달 정도가 개략적으로 확인되었다고 해도 가지굴 등 주변에 대한 영향성을 정확히 파악하기는 어렵다는 추가적 문제점도 있다. 특히, 동굴의 발달 정도를 조사자가 직접 확인하는 경우, 사람이 들어갈 수 있는 지역에 대한 해석이기 때문에 그 연장에 대한 해석이 석회동굴의 발달과 확장이 잘 된 지역의 양상을 보이는 측면에 집중될 수 있다.

석회동굴에 대한 조사는 내부 동식물 생태계를 보호하고 석회동굴 2차 생성물에 대한 파악과 안정성 확보를 위해 지질 전문가에 의해 조사가 이루어진다. 동굴 내부 접근하는 통로가 매우 협소하고 내부에 서식하는 동식물이 빛에 매우 민감하므로 기기를 통한 조사가 매우 어려운 난점이 있다.

따라서, 처음부터 최소한의 장비를 이용하여 석회동굴에 접근하여 조사된 자료를 이용하여 최적의 해석을 통해 석회동굴 주변의 지질공학적 특성을 파악하는 기법의 적용이 필요하다.

4.1. 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석

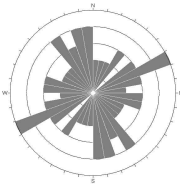




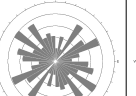
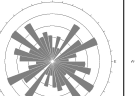
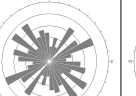






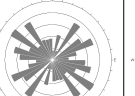
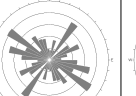

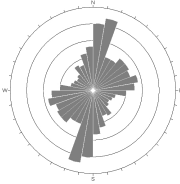
















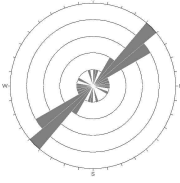







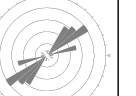







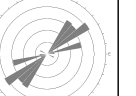
석회동굴은 암반 내 균열을 중심으로 용식이 시작되고 균열의 방향성을 따라 지속적으로 발달하게 된다. 이러한 방향성을 지시하는 인자로는 규모가 큰 단층이나 습곡 등이 있고, 지층경계면과 절리나 층리와 같은 불연속면 등이 있다. 다양한 방향성 인자들은 단일하게 분포하는 것이 아니라 복합적으로 나타나고 있기에 해당 지질 및 지반의 특성에 따라 방향의 우세한 정도가 각기 다르며, 가장 우세한 방향이 석회동굴의 형성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

그렇다면, 우세한 방향들이 밀집하고 있다고 할 때 연장성이 우수한 단층 하나와 주변에 발달한 다수의 미세 절리 중 어떤 것이 용식에 더 영향을 주는지를 고려할 필요가 있다.

Table 4.1.1에서 국내 석회동굴 9개소에 대한 동굴의 방향성 분포와 방향성에 연장성을 이용해 가중치가 적용된 분포에 대한 해석을 비교하여 제시하였다. 전체적으로 볼 때 방향성의 개수에 대한 표시만이 제시되는 방향성 해석만 보면 실제 동굴의 방향 분포와 다소 상이한 형태를 보이게 된다(Fig. 3.1.6, Fig. 3.2.6, Fig. 3.3.6, Fig. 3.4.6, Fig. 3.5.6, Fig. 3.6.6, Fig. 3.7.6, Fig. 3.8.6, Fig. 3.10.6). 이는 석회동굴의 다양한 발달 방향성의 특성이 단순한 방향성 분석에 포함되지 못하고 있기 때문이다. 그러나, 연장성을 이용해 가중치가 적용된 해석을 통해 보면 우세한 정도의 차이와 연장 및 발달의 방향을 보다 정확하게 추정할 수 있다.

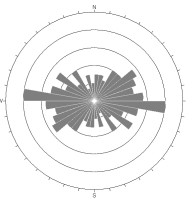





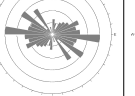
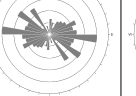
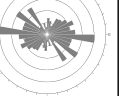
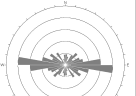
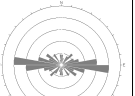
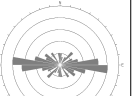
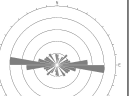
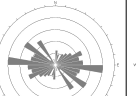
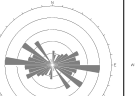
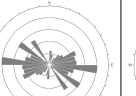
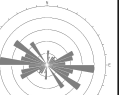
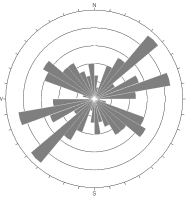

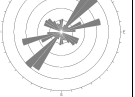
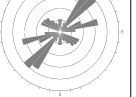



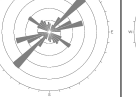






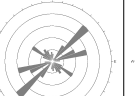
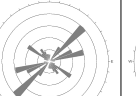

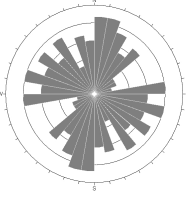
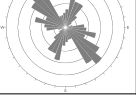
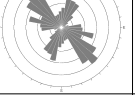
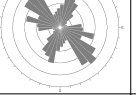
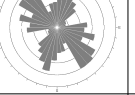
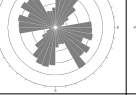
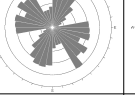
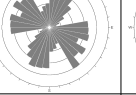
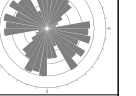





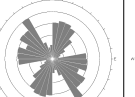
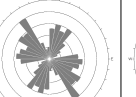

고수동굴의 경우, 방향성 분포만을 해석한 결과 N60~70°E과 N0~20°W, N30~40°W 등이 우세한 것으로 보인다.

Table 4.1.1. Comparison between analysis using only number of orientations and analysis using weighting for persistence of orientations in each limestone cave.

Cave	Orientation analysis	Orientation analysis using weighting for persistence									
		Criteria		Average Span Ratio Method(ASRM)				Individual Development Ratio Method(IDRM)			
				1	2	3	5	1.5	2	3	5
Gosu		below criteria	including								
			excluding								
Gossigul		below criteria	including								
			excluding								
Nodong		below criteria	including								
			excluding								

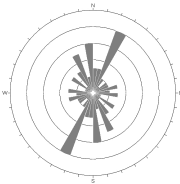



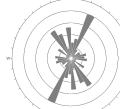
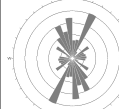
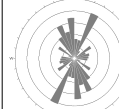

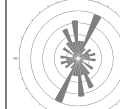




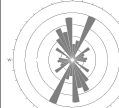

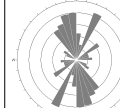
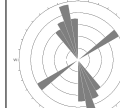
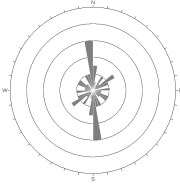



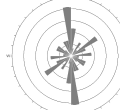







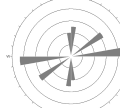




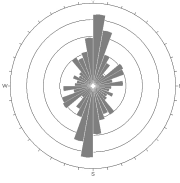



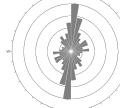
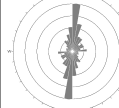
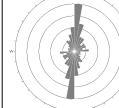
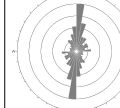
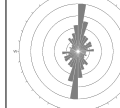


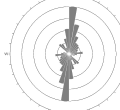
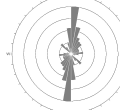
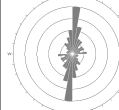
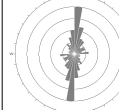


※ Note : Each number of criteria in ASRM is an average span ratio, in IDRM is a ratio of each persistence on span

Table 4.1.1. Comparison between analysis using only number of orientations and analysis using weighting for persistence of orientations in each limestone cave(*continued*).

Cave	Orientation analysis	Orientation analysis using weighting for persistence									
		Criteria		Average Span Ratio Method(ASRM)				Individual Development Ratio Method(IDRM)			
				1	2	3	5	1.5	2	3	5
Baeng-nyong		below criteria	including								
			excluding								
Seong-nyugul		below criteria	including								
			excluding								
Ondal		below criteria	including								
			excluding								

※ Note : Each number of criteria in ASRM is an average span ratio, in IDRM is a ratio of each persistence on span

Table 4.1.1. Comparison between analysis using only number of orientations and analysis using weighting for persistence of orientations in each limestone cave(*continued*).

Cave	Orientation analysis	Orientation analysis using weighting for persistence									
		Criteria		Average Span Ratio Method(ASRM)				Individual Development Ratio Method(IDRM)			
				1	2	3	5	1.5	2	3	5
Yongyeon		below criteria	including								
			excluding								
Cheongok		below criteria	including								
			excluding								
Hwan-seongul		below criteria	including								
			excluding								

※ Note : Each number of criteria in ASRM is an average span ratio, in IDRM is a ratio of each persistence on span

그러나, 연장성을 이용해 가중치를 적용해 해석하면 단순 방향성 분포에서 잘 나타나지 않은 N50~60°W의 방향성이 우세하게 나타나고 있다. 적용되는 해석법에 따라 다소 차이를 보이는데, 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 해석에 의하면 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)에서는 두각되지 않았던 N30~40°W와 N30~40°E 방향성이 나타나고 있다. 두 방향성들은 방향성 폭에 대한 발달 정도가 우수한 형태들로 지금은 우세한 형태를 보이지는 않을지 몰라도 점차 동굴 발달에 영향을 줄 수 있는 것으로 판단된다.

고씨동굴과 백룡동굴, 천곡동굴, 환선동굴의 경우 전체 발달 양상은 방향성만을 분석한 것과 연장성을 고려한 분석이 유사한 형태를 보이며 이차적인 분포의 형태에서만 차이를 보이고 있다.

노동동굴은 단순 방향성 분석과 연장성을 이용해 가중치를 적용한 분석이 유사한 듯 보이나 우세한 발달 정도가 다소 차이를 보인다. 방향성 분석에서는 N40~50°E 방향성이 우세하고 N50~60°E 방향성이 부합되어 나타나는 특성을 보인다. 그러나, 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 이용한 해석에서는 N30~40°E 방향성이 매우 우세하며 이차적으로 N40~60°E와 N70~80°E 방향성이 나타나고 있다. 또한, 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)의 해석에서는 N50~60°E의 방향성이 우세하며 이와 함께 N30~50°E, N70~80°E 방향성이 나타난다. 따라서 노동동굴의 연장성을 고려해 볼 때 전체 주요 방향성은 N30~60°E로 넓게 해석하는 것이 맞는 것으로 판단된다.

성류동굴의 분석 결과, 방향성 분석에서 나타난 N50~70°W의 방향성

이 연장성을 이용해 가중치가 적용된 해석에서는 명확하게 나타나지 않고 있다. 이는 해당 방향성의 경우 미세한 발달은 많이 있지만 동굴 형성을 이루는 연장을 보이는 발달은 미약한 것으로 해석된다.

온달동굴의 경우 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석의 필요성을 명확하게 보여주는 사례이다. 방향성 분석만을 보면 전체적으로 다양한 방향으로 발달되어 있어 정확한 발달 방향성을 판단하기 어렵다. 그러나, Fig. 3.6.6에서 보는 바와 같이 동굴도의 육안판단을 할 때, 전체적으로 북서-남동방향과 북북동-남남서방향이 우세한 패턴이 명확하게 나타난다. 이는 방향성만을 이용한 분석을 통해서만은 정확한 동굴 전체의 발달 방향성을 판단할 수 없다는 것이다.

이에 반해, 연장성을 이용해 가중치가 적용되는 해석 중 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용하였을 경우에는 N40~50°W 방향성을 중심으로 N30~60°W가 가장 우세하고 부수적으로 N10~40°E와 N70~80°W 방향성이 나타나는 것으로 해석된다. 또한, 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)에서는 N30~40°W를 중심으로 N40~90°W, N80~90°E와 N0~40°E의 방향성이 같이 나타나고 있다. 이는 온달동굴의 발달 특성이 연장성이 우수한 방향성과 발달이 미약한 방향성이 혼재되어 분포하기 때문인 것으로 판단된다.

이와 같이, 연장성을 이용해 가중치를 적용하여 석회동굴의 발달 방향성을 판단하게 되면 실제 동굴의 발달 방향성을 보다 정확하게 표현할 수 있게 된다.

용연동굴은 단순 방향성 분석과 연장성을 이용해 가중치를 적용한 분석에서 나타난 우세 방향성이 차이를 보이고 있다. 평균 폭 비율법

(Average Span Ratio Method)을 적용하면 N30~40°W 방향성이 가장 우세하고 단순 방향성 분석과 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)을 이용한 분석에서는 N20~30°E가 우세하게 나타나는 양상을 보인다.

이러한 경우 두 방향 모두 동굴의 발달에 영향을 미치는 것으로 해석하여야 할 것으로 판단된다.

전체적으로 볼 때 방향성 분석만으로는 동굴의 발달 정도와 그 영향성을 명확하게 판단할 수 없었지만, 방향성에 연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석에서는 동굴의 발달 정도를 반영하여 해석하기 때문에 더 명확한 해석이 가능한 것으로 판단된다.

연장성을 이용해 가중치를 적용한 해석을 위한 기준을 판단해 볼 때, 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)을 적용하게 되면 전체 평균 폭의 1, 2, 3배의 비율은 그 변화정도를 명확하게 판단할 수 있다. 하지만, 5배의 경우 매우 발달이 큰 것만 제시되기 때문에 부적절한 것으로 판단되었다.

개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)을 적용할 경우도 각 방향성의 폭 대 연장정도를 제시하는 기준이 1.5, 2, 3배의 비율은 해석에 도움이 된다. 한편, 5배의 경우 실제 동굴의 발달과는 다소 상이한 결과를 도출되기도 하므로 해석에는 부적절한 것으로 판단된다.

4.2. 방향성자료와 석회동굴 형성관계 해석

석회동굴은 암반 내 균열의 방향성과 규모에 영향을 받으며, 이를 탄산이 용해된 지하수와의 반응을 통해 주로 공동의 발달 및 확장이 이루어진다. 그 외에도 다양한 원인이 부합되어 복합적으로 이루어지기에 명확한 주원인을 밝히는 것은 매우 어려운 일이다.

그러나, 현재 형성된 동굴의 형상 내지는 방향성을 바탕으로 어느 지구조적 원인이 동굴 발달에 크게 영향을 미쳤는지를 판단하는 것은 가능하다.

광역 선구조와 석회동굴 주변의 불연속면 자료, 동굴의 방향성 등을 종합적으로 해석하면 각 석회동굴 발달이 주로 어떤 균열의 형태를 기반으로 형성되었는지를 판단할 수 있다.

각 동굴과 관련된 방향성 자료를 정리하면 Table 4.2.1과 같다. 제시된 각 동굴의 방향성들은 관련 항목별 방향성 자료를 취합하여 전체 방향성을 추출한 것이다.

고수동굴의 경우, 동굴 주변 주요 층리의 형태는 $N23^{\circ}W/75^{\circ}NE$ 과 $N5^{\circ}W/62^{\circ}SW$ 이다. 동굴의 발달 방향은 $N60\sim70^{\circ}E$ 과 $N50\sim60^{\circ}W$ 로 분석되었으며 이 중 $N50\sim60^{\circ}W$ 과 부수적으로 나타나는 $N30\sim40^{\circ}E$ 의 방향성이 선구조 분석에서도 나타나고 있다. 이는 고수동굴의 주변에 있는 고수리 단층과 사평리단층의 영향이 큰 것으로 판단되며, 그 외에 지구조적 원인으로 발달된 방향성이 동굴 형성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 층리의 경우 고수동굴의 발달에 영향을 미치기는 했지만 발달 방향성에 영향을 미친 정도는 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

Table 4.2.1. Orientations of limestone caves in South Korea.

Cave		Orientation		
		Lineament	Discontinuity	Development of Cave
Gosu	Main	N50~60°W	N23°W/75°NE(b)	N60~70°E N50~60°W
	Sub	N10~20°E N0~10°W N30~40°E	N5°W/62°SW(b) N79°E/58°NW(j)	N30~40°E N30~40°W
Gossigul	Main	N20~30°W N0~30°E	N58°E/44°NW(b)	N0~20°E
	Sub	N70~90°W	N5°E/66°SE(b) N51°E/76°SE(j)	N70~90°E N0~10°W N40~50°E
Nodong	Main	N0~10°W	N81°E/55°NW(b)	N30~60°E
	Sub	N0~10°W N30~40°E N60~80°W	N45°E/62°NW(b) N75°W/62°SW(j)	N70~80°E
Baengnyong	Main	N70~90°W	N77°E/28°NW(b)	N80~90°W
	Sub	N20~30°E N60~70°E	N86°W/65°SW(j) N15°W/66°SW(j)	N80~90°E N50~60°W N30~40°W
Seongnyugul	Main	N70~90°W	N65°W/29°NE(b)	N30~50°E
	Sub	N0~10°W N60~80°E	N64°E/89°NW(j) N9°W/75°SW(b)	N60~80°E N50~70°W
Ondal	Main	N50~60°E	N22°W/62°SW(b)	N0~20°E N30~60°W
	Sub	N70~90°W N20~40°E N30~40°W	N3°W/52°NE(b) N83°E/48°SE(j)	N10~40°E N70~80°W
Yongyeon	Main	N40~50°E	N78°W/54°SW(b)	N20~30°E N30~40°W
	Sub	N80~90°W N60~70°W N60~70°E	N23°E/41°NW(j) N37°W/76°NE(j)	N0~10°W N20~30°W
Cheongok	Main	N20~30°E	N43°W/16°SW(b)	N0~10°W
	Sub	N80~90°W N50~60°E N50~60°W	N26°W/88°NE(j) WE/90°(j)	N50~60°E N0~10°E N80~90°E
Hwaam	Main	N0~30°E	N11°E/15°NW(b)	-
	Sub	N70~90°W	N53°W/85°SW(j) N40°W/14°NE(j)	-
Hwanseongul	Main	N80~90°W	N9°W/90°(b)	N0~20°E N0~10°W
	Sub	N0~20°E N80~90°E N60~80°W	N72°W/18°NE(j) N2°E/74°NW(j)	N50~70°E N80~90°E

* Note : Parenthesis in Discontinuity is a kind of Discontinuities.
b-bedding, j-joint

고씨동굴의 방향성은 $N0\sim20^{\circ}E$ 이 매우 우수하게 나타나는데 이러한 특성은 선구조 분석($N0\sim30^{\circ}E$)과 불연속면 특성($N5^{\circ}E/66^{\circ}SE$)에서도 동일하게 나타나고 있다. 이러한 특성은 원인은 명확하지 않지만 동굴 발달에 단층과 같은 대규모의 지구조적 원인과 층리면과 같은 불연속면의 영향이 혼재된 상태로 해석할 수 있다.

김련(2003)의 주굴 발달이 층리면을 따른다는 연구 결과와도 일맥상통하는 해석이다. 그러나 막골층의 주요 층리를 $N15\sim45^{\circ}E/60\sim85^{\circ}NW$ 로 해석하고 공동의 방향성($N0\sim74^{\circ}E$) 중 주 발달 방향성을 $N30\sim44^{\circ}E$ 으로 해석한 점을 볼 때 본 연구와는 다소 상이하다.

층리가 내부와 외부가 다른 방향성을 보이고 있으며 동굴 발달 방향성이 $N0\sim20^{\circ}E$ 로 해석된 점과 선구조 및 주변 단층의 영향성을 비교할 필요가 있다. 단층 및 습곡과 같은 지구조적 영향이 공동의 발달에 영향을 크게 주었으며 층리의 변화도 유발했을 것으로 판단된다. 따라서 고씨동굴의 경우 단층의 영향이 우선적이었을 것으로 판단된다.

노동동굴의 경우, 동굴의 발달 방향이 $N30\sim60^{\circ}E$ 으로 해석되었으며 선구조에서는 이와 유사한 $N30\sim40^{\circ}E$ 이 확인되었고, 불연속면 분석에서는 $N45^{\circ}E/62^{\circ}NW$ 의 방향성이 나타나고 있다. 이는 층리의 방향성이 동굴의 발달에 큰 영향을 미치고 지층 경계면($N40\sim50^{\circ}E/60\sim70^{\circ}NW$)과 주변 단층의 영향이 동굴 발달 및 확장에 영향을 미친 것으로 판단된다.

백룡동굴은 주로 동서방향의 발달 양상을 보이고 있다. 불연속면의 상태와 선구조의 방향성에서도 모두 동서방향의 형태를 보이고 있다. 주변에 명확한 단층의 형상이 확인되지 않고 있고 선구조의 방향성만 나타나는 것으로 판단할 때 해당 백룡동굴은 층리의 방향성이 동굴의 발달에

영향을 많이 미친 것으로 판단된다.

성류동굴은 $N30\sim50^{\circ}E$ 의 방향성이 우세한 특성을 보이고 있으며 부수적으로 나타나는 $N60\sim80^{\circ}E$ 과 $N50\sim70^{\circ}W$ 이 선구조와 불연속면의 이차적으로 나타나는 방향성과 유사하다. 동굴 서측 매화천의 남북방향의 단층에서 분기된 북동-남서방향의 단층 방향과 동굴의 발달 방향과 유사한 형태를 보인다(Fig. 3.5.5). 이 단층의 영향이 동굴 발달에 영향을 많이 미쳤을 것으로 판단되며 부수적으로 층리와 절리의 발달이 동굴의 확장을 도왔을 것으로 추정된다.

온달동굴은의 방향성은 $N0\sim20^{\circ}E$ 과 $N30\sim60^{\circ}W$ 가 우세한 것으로 분석되었는데 선구조와 불연속면 방향성에서 명확한 일치성을 찾기가 어렵다. 온달동굴 북동측에 추정단층이 위치하는 것도 보고되고 있다. 따라서 동굴의 발달에 영향을 강하게 미친 것은 단층의 영향인 것으로 추정된다.

용연동굴의 경우 동굴 발달의 방향성과 선구조 및 불연속면의 방향성의 연관성을 명확하게 판단하기 어렵다. 그러나 용연동굴 주변에 복잡한 단층이 분포하고 남북 내지 북북서-남남동 방향의 단층으로 사교되고 있는데 이 영향으로 인해 동굴이 발달하고 있는 것으로 추정할 수 있다.

천곡동굴의 경우 주변에 단층과 같은 대규모 지질구조가 확인되지 않고 있고 복잡한 지층의 변화가 파악되지 않고 있다. 또한, 동굴 발달의 방향성과 선구조 및 불연속면의 방향성의 연관성을 명확하게 판단하기 어렵다. 이러한 특징은 천곡동굴이 위치하고 있는 대기석회암층이 주로

괴상을 이루거나 명확하지 않은 층리를 보이기 때문으로 해석된다.

선구조의 N50~60°E과 동서방향의 방향성을 볼 때 동굴의 발달 방향과 유사한 것으로 확인되고 있기에, 층리보다는 단층과 같은 지구조적 영향성이 더 컸을 것으로 추정되기는 한다. 하지만 주된 연관성을 찾기가 어렵기에 모든 방향성 자료의 영향은 보조적으로 있는 동굴 발달로 판단된다.

환선동굴은 주로 남북방향의 발달 양상을 보인다. 이러한 특징은 선구조와 불연속면 분석에서 모두 나타나고 있다. 그러나 불연속면의 방향성과 매우 유사한 형상이므로 전체적으로 층리의 방향이 동굴 발달의 영향을 크게 미치고 추가적으로 남북방향의 단층과 같은 선구조가 영향을 준 것으로 판단된다.

총 10개소의 석회동굴에 대한 동굴 발달 방향성에 대한 방향성 요인을 정리하면 Table 4.2.2와 같다.

석회동굴이 위치하는 기저지질은 주로 막골층과 대기층으로 구분할 수 있으며 기저지질에 대한 분류적 특징은 부족한 것으로 판단된다.

석회동굴 형성 및 발달에 영향을 주는 방향성 인자는 다양하지만, 동굴 발달 방향과의 유사정도를 파악하여 해석해 보면 주된 영향을 준 것으로 판단되는 방향성 인자를 추정할 수 있을 것으로 본다.

고수동굴과 고씨동굴, 성류동굴, 온달동굴, 용연동굴, 천곡동굴 등은 주변 단층 및 단층의 특성을 내포하는 선구조의 방향성과 유사한 형태인 것으로 해석되었다. 이에 반해, 노동동굴, 백룡동굴, 환선동굴은 동굴 발

달의 방향성은 주변 단층의 영향성도 있지만 주로 층리와 유사한 형태를 보이는 것으로 보아 층리의 영향이 큰 동굴들로 해석되었다.

화암동굴의 경우 광산 개발당시 확인된 곳으로 동굴 내부의 발달 양상이 아직 정확하게 조사되지 않았기에 분류에서는 제외되었다. 분류의 형태를 정의한다면 균열이 발달이 일부 지역을 중심으로 이루어졌고 확장의 형태가 명확하지 않았으며, 외부로의 동굴 연결이 부족한 점으로 볼 때 국부적 발달 형태로 판단된다.

Table 4.2.2. Expected influential factors for development of each limestone cave.

Cave	Based geology	Estimated influential factors	
		Main	Sub
Gosu	Makgol formation	fault(lineament)	joint, bedding
Gossigul	Makgol formation	fault(lineament)	bedding, joint
Nodong	Makgol formation	bedding	fault(lineament), joint
Baengnyong	Makgol formation	bedding	fault(lineament), joint
Seongnyugul	Deagi formation	fault(lineament)	joint, bedding
Ondal	Makgol formation	fault(lineament)	joint, bedding
Yongyeon	Makgol formation	fault(lineament)	joint, bedding
Cheongok	Deagi(Pungchon) formation	–	lineament, joint, bedding
Hwaam	Deagi(Pungchon) formation	–	–
Hwanseongul	Deagi formation	bedding	fault(lineament), joint

4.3. 석회동굴의 발달 양상

4.3.1. 연장성과 폭

석회동굴의 발달은 단층이나 습곡, 불연속면 등의 방향성을 따라 진행하기도 하지만 폭(span)을 넓혀가면서도 그 형상을 확장시킨다.

Table 4.3.1은 각 동굴의 평균 폭과 동굴에 분포하는 방향성의 폭에 대한 연장성을 반영한 개별 발달 비율(Individual Development Ratio)의 정도를 제시한 내용이다.

폭의 발달은 각 방향성의 발달 양상을 중심으로 해석할 수 있다. 이는 동굴의 발달을 주도하는 방향성의 분포를 판단하는데 활용이 가능하다.

각 동굴의 평균 폭은 전체적인 동굴 발달 양상을 의미하는 것으로 온달동굴의 평균 폭은 2.42m로 가장 좁은 형태의 폭 발달을 보이는 것으로 분석되었으며, 그 다음으로 좁은 동굴은 성류동굴이다. 가장 넓은 동굴의 발달을 보이는 것은 천곡동굴로 평균 폭이 7.88m인 것으로 분석되었다.

전체 동굴 중 용연동굴과 천곡동굴의 경우 전체 동굴의 평균 폭이 가장 넓은 동굴들이며 다른 동굴에 비해 개별 발달 비율이 가장 낮은 것으로 해석되었다. 이는 동굴이 발달되는 정도가 상대적으로 낮은 상태임을 의미한다. 두 석회동굴만이 개별 발달 비율(Individual Development Ratio)이 1.5이상되는 분포가 90%미만이며, 더욱이 폭에 비해 5배의 연장성을 가지는 비율이 약 9.8%와 19.8%를 보여 연장성이 약한 동굴로 해석된다.

또한, 천곡동굴은 풍촌석회암에 대비되는 대기층에 해당되는 기저지질을 보이는 특징을 가지고 있다(Table 4.2.2). 천곡동굴의 경우 주로 괴상

의 형태를 보이며 선구조의 방향성 및 불연속면의 방향성과 동굴 발달 방향성의 비교에 있어서 명확한 연관성을 찾기 어려운 동굴이다.

관련 내용을 종합해 볼 때 용연동굴과 천곡동굴의 연장성이 떨어지는 것으로 보아 주변 방향으로 추가적인 발달 가능성은 다른 석회동굴에 비해 작은 것으로 판단된다.

이에 반해 다른 동굴들은 개별 발달 비율(Individual Development Ratio)이 1.5이상인 비율이 대개 90%를 넘고 있기에 연장성을 보이는 발달정도가 우수한 것으로 판단된다.

특히, 노동동굴의 경우 개별 발달 비율이 5이상인 분포가 68.4%를 보이고 있다. 이는 연장성이 우수한 동굴을 의미하는 것을 넘어 추가적인 동굴의 연장 가능성이 다른 동굴에 비해 클 것으로 예상된다.

개별 발달 비율(Individual Development Ratio) 5이상인 분포 상태가 가장 좋은 노동동굴과 백룡동굴은 동굴의 발달 영향성 분석에 있어서 층리의 영향이 상대적으로 큰 것으로 분류된 동굴들이다. 층리의 영향성이 동굴 발달에 많은 영향을 줬을 것으로 분류된 환선동굴의 경우는 비율이 5이상인 분포가 32.4%인 정도로만 분석되었다.

이는 층리가 동굴 발달에 영향을 크게 준 경우 각 동굴 내 폭 대비 연장의 발달 비율이 다른 원인에 의해 발달이 진행된 동굴에 비해 상당히 우수한 것으로 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4.3.1. Average span and Individual development feature.

Cave	Extracted orientation number	Average span (m)	Individual Development Ratio*			
			1.5	2	3	5
Gosu	49	5.67	46 (93.9%)	42 (85.7%)	28 (57.1%)	17 (34.7%)
Gossigul	324	3.08	305 (94.1%)	279 (86.1%)	216 (66.7%)	122 (37.7%)
Nodong	19	5.97	19 (100%)	18 (94.7%)	17 (89.5%)	13 (68.4%)
Baengnyong	143	3.72	131 (91.6%)	122 (85.3%)	88 (61.5%)	57 (39.9%)
Seongnyugul	117	2.89	108 (92.3%)	91 (77.8%)	67 (57.3%)	34 (29.1%)
Ondal	162	2.42	155 (95.7%)	137 (84.6%)	106 (65.4%)	54 (33.3%)
Yongyeon	51	5.97	45 (88.2%)	38 (74.5%)	22 (43.1%)	5 (9.8%)
Cheongok	31	7.88	23 (74.2%)	18 (58.1%)	12 (38.7%)	6 (19.4%)
Hwanseongul	336	5.41	314 (93.5%)	280 (83.3%)	219 (65.2%)	109 (32.4%)

**Note : Individual Development Ratio is a ratio of each persistence on span
Each number in the parenthesis is a portion of extracted orientation*

4.3.2. 층리와 폭

층리는 퇴적암의 층서적 상태를 나타내기도 하지만 풍화가 진행이 되면 풍화의 진행에 영향을 주는 요소가 될 수도 있다. 초기에는 지질의 상태를 포함하는 수평을 이루었지만, 시간이 흐름에 따라 지구조적 영향을 받아 다양한 경사각의 층리면 상태를 보이며 풍화에 일조하게 된다.

지하수의 경우 단층면이나 균열을 형성한 층리면을 따라 유로를 형성하며 이동하게 되는데 석회암지대에 있어서 이를 통해 확장의 정도가 달라진다고 할 수 있다. 중력의 영향으로 지하수면으로 이동하려는 지하수의 경우 수평의 층리면의 영향이 클 경우 폭의 확장이 커지고 수직의 층리면을 보이는 경우 폭의 확장이 작아지는 결과를 보이게 된다.

Table 4.2.1을 보면 9개 석회동굴의 주요 불연속면의 상태를 확인할 수 있으며 이 중 각 동굴의 석회암층의 층리면의 방향성을 확인할 수 있다.

주 층리면의 경사각을 보면, 화암동굴과 천곡동굴의 층리면 각이 약 15~16°의 상태를 보이고 환선동굴의 경우 90°의 수직상태를 보이고 있다. 이러한 경사각의 상태를 Table 4.3.1에 정리된 각 동굴의 평균 폭과 비교하여 보았다.

Fig. 4.3.1에서 보는 바와 같이 전체 폭의 평균의 상태를 분석해 보면, 평균 5.4(m) 이상이 되는 그룹과 평균 3.8m 이하가 되는 그룹으로 나뉘고 있다. 전체적인 패턴에서는 뚜렷한 경향을 확인하기 어렵지만, 그룹화하게 되면 그룹 내 특징을 확인하게 된다.

평균 폭과 층리의 각의 상관성을 확인해 보면, 고수동굴 및 노동동굴, 용연동굴, 천곡동굴, 환선동굴을 포함하는 평균 폭 상위 그룹은 약 $R^2=0.993$ 의 매우 우수한 상관성을 보이고 있다. 이에 반해, 고씨동굴 및

성류동굴, 온달동굴, 백룡동굴이 포함된 하위 그룹은 $R^2=0.580$ 의 상관성만을 보이는 것으로 분석되었다.

이를 바탕으로 볼 때 석회동굴 폭의 발달은 동굴 방향성 형성에 영향을 주는 주요 요인인 층리나 단층의 영향성 보다는 주변 층리면의 경사각과 밀접한 연관성이 있음을 의미한다. 층리면의 경사각이 저각일수록 석회동굴의 평균 폭은 증가하는 경향을 보인다고 할 수 있다.

석회동굴의 폭에 대한 특성은 총 9개의 동굴에 대한 결과만을 해석한 결과이다. 더 많은 동굴조사 자료를 바탕으로 해석하면 보다 정확한 특징을 보일 수 있으나, 현재 9개의 석회동굴 폭 자료를 기초로 하여 판단할 때 약 5m 이상일 경우에만 해당되는 특징이다. 그 이하일 경우에는 정확한 판단을 하기는 어렵다.

점차 폭을 형성하여 하위그룹이 상위그룹처럼 석회동굴 평균 폭이 약 5m 이상으로 확대되는 과정에서 나타나는 특징인지 지역적 특성으로 인해 나타나는 특징인지는 명확하지 않다. 그러나, 이 후 더 많은 동굴에 대한 자료를 통해 분석하면 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

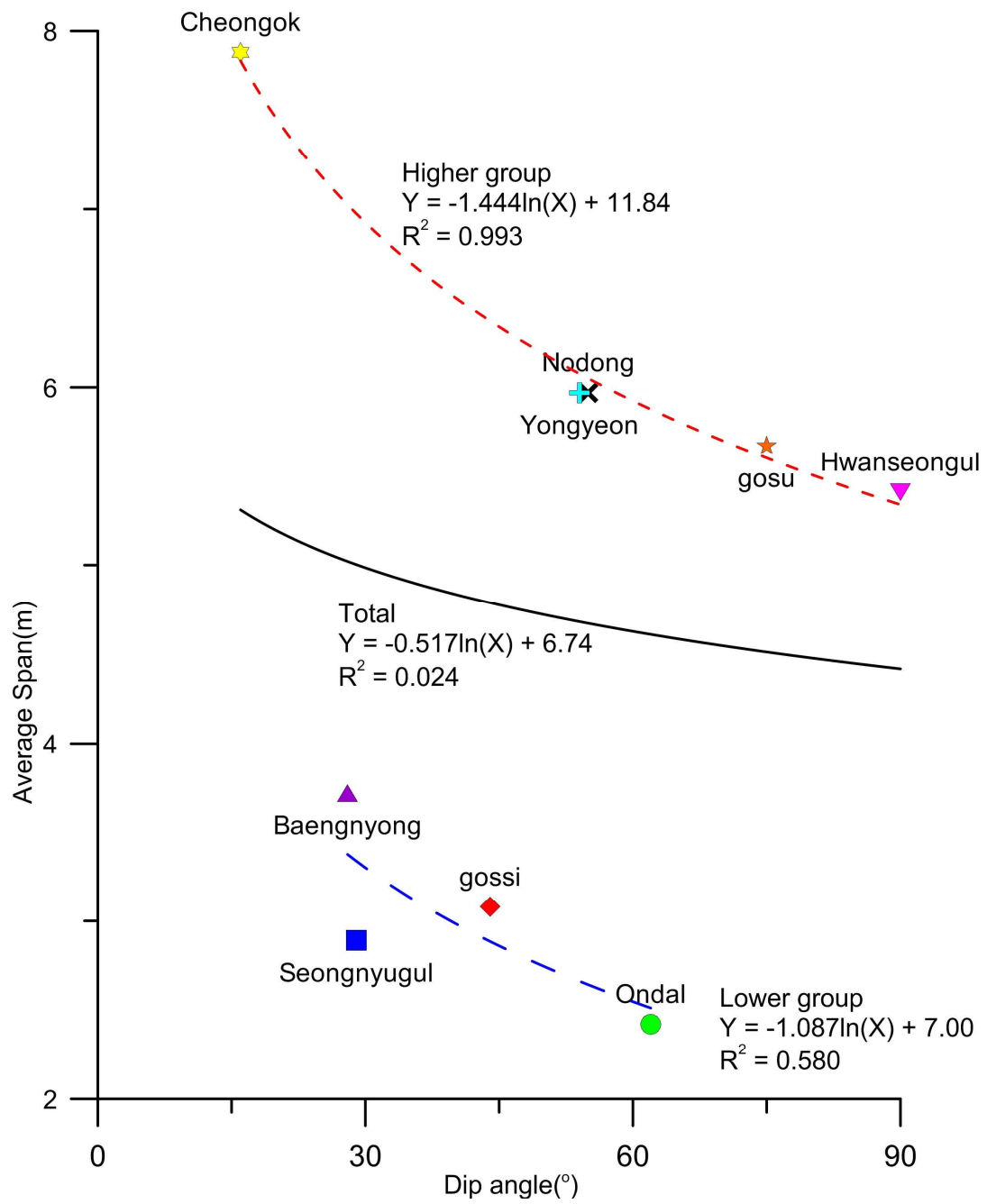


Fig. 4.3.1. Dip angle and Average span.

4.4. RMR을 통한 지질공학적 해석 접근

4.4.1. RMR 특성

국내 석회동굴의 총 10개에 대해 지질과 현장 불연속면 특성 자료를 바탕으로 RMR 분석을 수행하였다(Table 4.4.1).

전체적으로 RMR 수치가 32~59의 범위를 보이는 것으로 분석되었다. 대체로 양호한 정도(Fair rock)를 보이지만 일부 지역의 경우 암반이 불안한 정도(Poor rock)인 것으로 나타났다.

가장 낮은 수치를 보이는 지역은 노동동굴로 입구의 좌·우측 지점으로 32와 34를 보여 암반 상태가 불안한 정도(Poor rock)인 것으로 분류되었다. 노동동굴은 동굴 내부의 낙석 및 오염 등과 같은 여러 원인으로 인해 현재 일반인 출입이 금지된 지역이다.

또한, 불안한 정도로 분류된 곳은 백룡동굴의 입구 우측 사면과 화암동굴의 입구 주변 사면, 환선동굴의 입구 좌측면 등으로 3개소이며, RMR 수치는 39로 분류된 지역이다.

전체적으로 불안 정도를 보이는 4개 지역의 경우 RQD가 상대적으로 낮은 수치를 보이는 것으로 분류되었다. 이는 체적 절리 계수의 낮은 상태를 의미하는 것으로 암반내 절리 및 층리가 다수 발달하기 때문으로 풀이된다.

그 외의 지역은 전반적으로 42~59로 양호한 정도(Fair rock)인 것으로 분류되었다.

Table 4.4.1. Rock Mass Rating(RMR) of 10 limestone caves in South Korea.

Cave	Location		Parameter						Classification
			Strength	RQD	Spacing	Condition of discontinuities	Ground water	Total	
			15	20	20	30	15	100	
Gosu	Entrance	Left lateral	4	13	10	9	10	46	Fair rock
		Right lateral	2	17	10	9	10	48	Fair rock
	Exit	Left lateral	2	20	10	20	7	59	Fair rock
		Right lateral	2	13	8	21	7	51	Fair rock
Gossigul	Entrance	Upper slope	4	13	5	9	10	41	Fair rock
		Right slope	4	20	10	11	10	55	Fair rock
Nodong	Entrance	Left slope	2	3	8	9	10	32	Poor rock
		Right slope	2	3	8	11	10	34	Poor rock
Baengnyong	Entrance	Right slope	4	8	8	9	10	39	Poor rock
Seongnyugul	Entrance	Left slope	4	20	15	9	10	58	Fair rock
		Right slope	2	17	10	9	10	48	Fair rock
Ondal	Entrance	Left lateral	7	20	5	11	10	53	Fair rock
		Right lateral	2	17	8	14	10	51	Fair rock
Yongyeon	Entrance	Right lateral	4	17	10	9	10	50	Fair rock
Cheongok	Entrance	Upper slope	4	20	15	9	10	58	Fair rock
Hwaam	Entrance	Surrounding slope	4	8	8	9	10	39	Poor rock
	Exit	Left lateral	4	3	10	18	7	42	Fair rock
Hwanseongul	Entrance	Left lateral	2	8	10	9	10	39	Poor rock

RMR 해석을 적용한 지점들은 석회동굴의 입·출구 주변으로 국부적인 상태를 표시한다고 할 수 있다. 또한, 석회동굴의 특성상 내부에서 다른 불연속면의 특성으로 인해 동굴이 형성될 수도 있다는 해석적 전제가 뒤따른다.

따라서, RMR 기법의 적용이 해당 석회동굴의 전체를 지시하는 것으로 판단하기는 어렵다. 하지만, 초기 조사가 접근할 현장조사 자료만을 이용하여 해석에 접근한다면 처음부터 유용한 해석에 도달할 것으로 판단된다.

4.4.2. RMR과 동굴 방향성 특징

고수동굴, 고씨동굴, 성류동굴, 온달동굴, 용연동굴 등은 단층과 같은 지구조적 요인의 영향성이 큰 것 분류된 동굴들이며, 노동동굴, 백룡동굴, 환선동굴은 미세 단층과 같은 구조지질학적 요인의 영향도 있지만 층리의 영향이 큰 것으로 분류되었다(Table 4.2.2).

RMR 분석을 통해 불안한 정도(Poor rock)로 분류된 노동동굴과 백룡동굴, 화암동굴, 환선동굴이다(Table 4.4.1).

각 석회동굴 내 개별 발달 비율이 5이상인 방향성의 분포를 볼 때, 가장 발달 비율이 우수한 곳은 노동동굴과 백룡동굴이며, 환선동굴의 경우 다소 떨어지는 32.4%의 수치를 보이고 있다(Table 4.3.1).

세 자료를 놓고 보면 동굴 발달 방향성이 층리방향과 유사한 형태를 보이거나 주로 층리의 영향으로 형성된 것으로 판단될 경우 동굴의 폭 대비 연장의 발달이 큰 것으로 해석되며, 암반의 상태가 불안할 가능성이 큰 것으로 추정할 수 있는 것으로 판단된다.

이러한 해석은 국부적 자료를 바탕으로 하고 있다. 불연속면 조사가 동굴 입출구부를 중심으로 수행되었기에 동굴 내부의 변화될 수 있는 방향성의 특성은 내포하지 못하는 단점이 포함된 해석이다. 그러나, 이러한 해석 접근은 갱내의 불연속면 자료를 추가하고 더욱 정확한 지질자료와 동굴 내부의 방향성을 추출한다면 그 해석의 매우 정확할 것으로 판단된다.

4.5. 지질공학적 분류로의 접근

석회동굴이 위치하는 카르스트 지형은 지반침하, 공동의 형성, 지하수의 급변 등 다양한 원인에 의해 지반 안정성 해석이 어렵고 구조물 건설에 지장을 초래할 수 있다.

따라서, 카르스트 지형에 대한 다양한 해석과 분류는 지질공학적 접근에 있어 매우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

최근 Waltham and Fookes(2012)은 지질공학적 측면에서 각 지역을 분류하는 기준을 제시하였는데, 이를 바탕으로 조사된 10개소의 국내 석회동굴지역에 대한 분류를 개략적으로 접근함으로써 해석의 다양성을 표현하고자 한다(Fig. 2.1.3, Table 2.1.1).

4.5.1. 각 요인별 특징

Waltham & Fookes(2012)에 의해 제시된 분류 기준은 위치적 특성(Location), 싱크홀(Sinkhole), Rockhead, 균열(Fissuring), 동굴(Cave), 지반상태(Ground investigation), 기초(Foundation) 등이다.

각 요인별 특징을 해석하여 분류에 적용해 보고자 한다.

4.5.1.1. 위치적 특성(Location)

우리나라는 사계절이 뚜렷한 온화한 기후를 보인다. 그러나 전세계가 온난화의 몸살을 앓아가며 우리나라도 2100년 경에는 아열대기후를 보일 것으로 보고되고 있다(권영아 외, 2007).

이를 바탕으로 판단할 때 현재 국내 전체 지역은 $k_{III_Location}$ 에 해당된다.

4.5.1.2. 싱크홀(Sinkhole)

싱크홀의 발생이 거의 미약한 상태(k I)에서 대규모 싱크홀이 발생하는 상태(k V)로 분류된다.

본 연구에서 조사된 석회동굴 지역은 주로 암반이 많이 노출되거나, rockhead의 일부가 노출된 산지에 위치한다. 계곡에 위치한 경우도 암사면 측면에 위치하고 있어서 싱크홀의 흔적의 확인은 매우 어렵다. 실제로 석회동굴 주변에서 싱크홀의 발생이 있는지를 정확하게 판단하기가 어려우므로 해석에서 제외되는 것이 타당하다.

그러나 고수동굴 및 노동동굴, 온달동굴이 위치한 단양 및 제천 지역은 대규모 돌리네와 우발레가 넓게 분포하는 지역이다. 따라서 정확한 조사가 이루어지지 않는 않지만 싱크홀의 발생이 일부 지속적으로 나타날 수 있는 것으로 예상할 수 있기에 kⅢ_{sinkhole}로 설정해야 한다.

천곡동굴의 경우 주변에 돌리네가 소규모로 형성되어 있기는 하지만 과거의 형성된 형태이며 추가적인 싱크홀은 흔적을 찾기는 어렵다. 또한, 인근에 과거 싱크홀의 형태가 보고되지 않고 있다. 이는 단양 및 제천 지역에 비해서는 싱크홀 추가 발생 및 위험성은 낮을 것으로 추정되는 것이며 kⅡ_{sinkhole}로 설정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Fig. 4.5.1에서 보는 바와 같이 환선동굴 주변에 고랭지 배추를 재배하는 마을이 있는데, 해당지역은 석회암지대로 테라로사(terra rossa)가 풍부하여 배추경작을 주로 하는 곳이다.

주변 지형상황을 볼 때 대규모 함몰돌리네 지역으로 판단되며 rockhead가 관찰되고 경작이 가능한 지표상태를 보이고 있다.

주민들에 의하면 간혹 경작지 사이로 싱크홀이 발생되기도 한다고 한

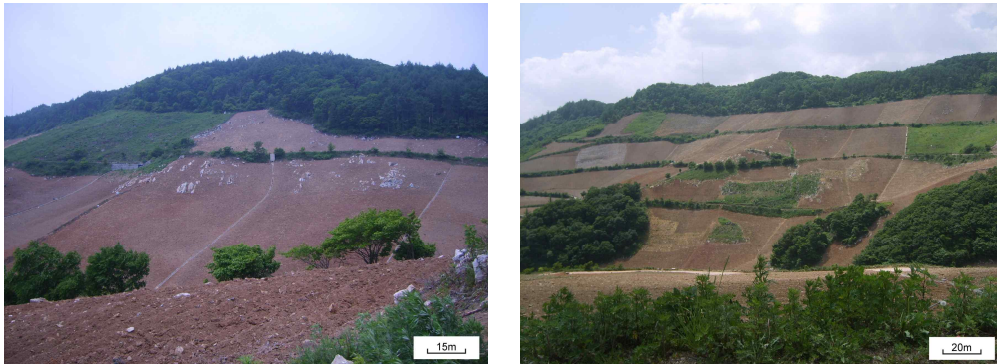


Fig. 4.5.1. Guinemi village around Hwanseongul Cave.

다. 이를 볼 때 다른 지역과 달리 환선동굴 주변은 카르스트의 성숙도 (maturity)가 상당히 진행되는 상태로 판단된다. 따라서, 환선동굴의 경우 $k_{III_sinkhole}$ 로 해석하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

4.5.1.3. Rockhead

석회동굴 주변은 지표이 대부분 토사로 뒤덮여 있으며 일부 노두의 노출이 있는데 rockhead로 판단된다. rockhead의 폭을 명확하게 판단하기는 어려우며 수직적인 용식의 발달이 있는 것은 추정할 수 있지만 큰 규모를 확인하기는 어렵다.

그러나, 환선동굴 주변 귀네미 마을은 조금 다르다. 산 정상부임에도 불구하고 두터운 퇴적층과 rockhead의 상태를 확인할 수 있다(Fig. 4.5.2).

이러한 상황을 볼 때, 대부분의 석회동굴 지역은 $k_{II_rockhead}$ 이며, 환선동굴만 $k_{III_rockhead}$ 로 판단된다.

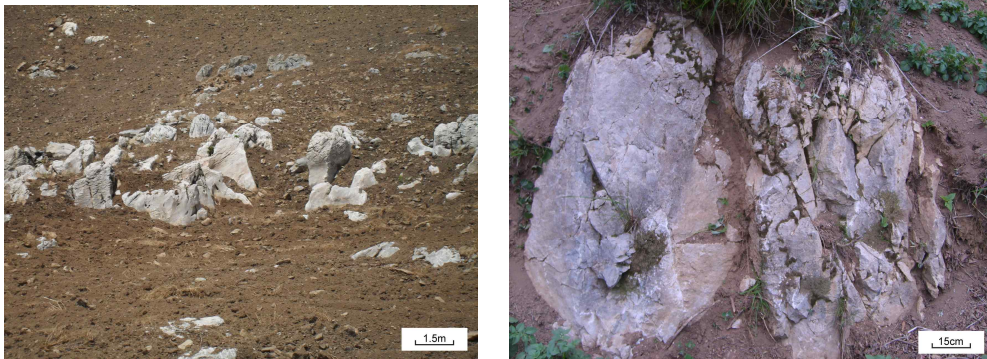


Fig. 4.5.2. Rockhead in Guinemi village around Hwanseongul Cave.

4.5.1.4. 균열(Fissuring)

석회동굴 주변의 rockhead의 확인이 어렵고 상부 표토 하부의 암반내 균열의 발달을 명확하게 확인하지는 못하였지만 동굴의 발달 양상과 노두의 상태를 보고 추정컨대, 이차적인 균열의 확장은 있는 것으로 예상된다.

환선동굴은 $k_{III}^{Fissuring}$ 로 판단되며 다른 지역은 rockhead의 확인이나 싱크홀의 상태를 명확하게 판단하기 어려운 상태이기에 $k_{II}^{Fissuring}$ 로 추정된다.

4.5.1.5. 동굴(Cave)

조사된 석회동굴 중 화암동굴의 경우 동굴 발달의 연장이 지표로 노출된 것이 아니라 금광개발로 인해 확인된 곳이다. 연장의 발달 정도가 미약하고 국부적인 상태로 판단되기에 화암동굴은 k_{I}^{Cave} 로 판단된다.

그 외의 동굴의 상황을 판단하여 볼 때 고수동굴, 노동동굴, 온달동굴,

천곡동굴은 kⅡ_{Cave}로, 고씨동굴, 백룡동굴, 성류동굴, 용연동굴, 환선동굴은 kⅢ_{Cave}로 예상된다.

4.5.1.6. 지반상태(Ground investigation), 기초(Foundation)

조사가 이루어진 10개의 동굴은 대개 산지에 위치하고 있거나 천곡동굴과 같이 평지에 위치하더라도 개발이 진행된 상태여서 평지의 상태를 확인하기는 어렵다. 그러나 일부 현장 상태를 확인한 결과, 대부분 지표의 표토가 1~2m 내외의 표토로 뒤덮여 있고 일부만 rockhead가 노두로 나타나는 특성을 보이는 것으로 예상된다.

따라서 해당 요인은 전체적으로 kⅡ_{Ground investigation}로 판단된다.

또한, 기초의 경우 판단이 난해하여 개략적 평가에서는 제외하여 분류하고자 한다.

4.5.2. 카르스트 지형의 분류

총 7개의 요인 중 시추 내지는 굴착에 의한 확인이 필요한 기초(Foundation)에 대한 해석을 제외한 6개의 요인을 추정하여 분류하면 Table 4.5.1과 같다.

전체적으로 국내 석회암지대는 kⅡ(Youthful) 단계인 것으로 판단되며, 환선동굴의 경우 대규모 석회공동지대를 이루고 주변 상황을 판단컨대, kⅢ(Mature)인 것으로 예상된다.

Table 4.5.1. Karst classification for area around limestone caves in South Korea.

Cave	Parameter						Karst class
	Locations	Sinkholes	Rockhead	Fissuring	Cave	Ground investigation	
Gosu	k II	k III	k II	k II	k II	k II	k II ₆
Gossigul	k II	k II	k II	k II	k III	k II	k II ₆
Nodong	k II	k III	k II	k II	k II	k II	k II ₆
Baengnyong	k II	k II	k II	k II	k III	k II	k II ₆
Seongnyugul	k II	k II	k II	k II	k III	k II	k II ₆
Ondal	k II	k III	k II	k II	k II	k II	k II ₆
Yongyeon	k II	k II	k II	k II	k III	k II	k II ₆
Cheongok	k II	k II	k II	k II	k II	k II	k II ₆
Hwaam	k II	k II	k II	k II	k I	k II	k II ₆
Hwanseongul	k II	k III	k III	k III	k III	k II	k III ₆

**Note : The N of kIII_N is evaluation factor number of total factor(7)*

5. 결 론

석회암지대에 다양하게 발달하고 있는 석회동굴에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. 또한, 석회동굴의 발달 영향은 위치하고 있는 지질과 주변 불연속면, 지하수의 변화 등에 의해 복합적으로 형성되고 있다.

국내 석회암지대에 발달하고 있는 10개의 석회동굴의 지질과 동굴관련 자료를 종합하여 해석한 결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 석회동굴의 정확한 동굴 방향성 분석을 위해 연장성을 고려한 해석을 위해 연장성을 고려한 해석을 위하여 동굴 내 방향성의 폭을 모두 추출한 후 전체 폭의 평균을 기준으로 판단하는 평균 폭 비율법(Average Span Ratio Method)과 각 방향성의 폭에 대한 연장의 비율을 기준으로 판단하는 개별 발달 비율법(Individual Development Ratio Method)을 제안하여 분석하였다. 분석 결과, 기존의 방향성 분포만을 해석한 것보다 두 가지 방식을 적용한 해석기법이 동굴 발달 방향성을 실제 방향성과 더욱 유사하게 표현하고 있음을 알 수 있었다. 특히 온달동굴의 경우 방향성 분포만을 이용하여 해석할 경우 불규칙한 다양한 방향성을 보여 정확한 동굴의 발달 양상을 해석하기 어렵지만 연장성을 고려한 해석에서는 동굴의 발달 방향성을 잘 나타내도록 해석되는 것으로 파악되었다.
2. 국내 석회동굴 10개소의 광역선구조 분석과 석회동굴 주변의 불연속면 자료 등을 이용하여 석회동굴의 발달 방향성이 어떤 구조지질학적 요인과 주로 연계되어 있는지를 해석한 결과, 노동동굴, 백룡동굴, 환

선동굴은 주로 층리의 방향성과 동굴 발달 방향성이 유사하여 주 발달의 영향이 층리면에 의한 것으로 분석되었다. 그 외에 고수동굴, 고씨동굴, 온달동굴, 성류동굴, 용연동굴 등 5개의 지역은 주 영향성이 단층 등의 영향성을 잘 내포하는 광역 선구조의 방향성과 주로 유사한 형태를 보이는 것으로 해석되었다.

3. 석회동굴의 평균 폭과 연장성을 고려한 개별 발달 비율(Individual Development Ratio)을 비교 분석한 결과, 노동동굴이 폭에 대한 연장성이 가장 우수한 동굴로 분석되었다. 이에 반해 용연동굴과 천곡동굴의 경우 개별 발달 비율(Individual Development Ratio)이 1.5이상되는 분포가 90%미만이며, 5이상 비율이 약 9.8%와 19.8%를 보여 연장성이 약한 동굴로 해석된다. 이는 용연동굴과 천곡동굴은 지속적인 동굴의 발달 가능성이 미약한 것으로 판단된다.
4. 석회동굴이 형성된 폭과 주변 주 층리의 경사각의 연관성 분석을 해석한 결과, 각 동굴의 폭 평균이 5.4m 이상이 되는 그룹(상위그룹)과 3.8m 이하가 되는 그룹(하위그룹)으로 분류되며, 상위그룹에서는 $R^2=0.993$, 하위그룹에서는 $R^2=0.580$ 의 상관성을 보이는 것으로 해석되었다. 이는 석회동굴 주변의 층리면의 경사각이 저각일수록 그 평균 폭은 증가하며, 석회동굴의 발달에 어떤 방향성 인자가 영향을 주더라도 석회동굴의 폭 발달에는 저각의 층리의 영향이 큰 것을 확인할 수 있었다.
5. 국내 석회동굴의 지반상태를 파악하고자 각 석회동굴의 지질과 현장 불연속면 특성 자료를 바탕으로 RMR 분석 결과, 대체로 양호한 정도

(Fair rock)를 보이고 있다. 그러나, 노동동굴과 백룡동굴, 화암동굴, 환선동굴의 일부 지역의 경우 암반이 불안한 정도(Poor rock)인 것으로 분석되었다.

6. 동굴의 발달 방향성과 기반암의 암종, 동굴 발달의 주된 영향을 주는 방향성 인자, RMR을 통한 암반분류 등을 종합적으로 해석해 보면, RMR에서 불안한 정도(Poor rock)인 것으로 분류된 노동동굴과 백룡동굴, 환선동굴은 주로 층리의 영향을 받아 발달된 것으로 판단된다. 또한, 개별 발달 비율(Individual Development Ratio)이 5이상인 방향성의 분포를 볼 때, 가장 발달 비율이 우수한 곳은 노동동굴과 백룡동굴로 해석되고 있다. 이는 층리의 영향이 석회동굴의 발달에 주로 영향을 미친 지역은 단층과 같은 방향성 인자에 의해 발달된 동굴에 비해 연장성이 우수하지만 암반의 안정성은 다소 떨어지는 것으로 판단된다.

7. 최근 석회암지대의 지질공학적 분류의 방안을 제시한 Waltham & Fookes(2012)의 분류체계 적용한 결과, 전체적으로 국내 석회암지대는 kII(Youthful) 단계인 것으로 판단된다. 그러나, 주변에 대규모 석회공동지대를 이루고 있는 환선동굴의 경우 kIII(Mature)인 것으로 분류되었다. 제시된 분류항목 총 7개 중 기초(Foundation)를 제외한 6개 항목에 대해 정성적 판단을 바탕으로 해석하였다.

참 고 문 헌

- 강원대학교자원개발연구소, 1989, 백룡굴 학술조사 보고서. 164p.
- 경만호, 변태근, 임병기, 1993, 노동굴의 환경변화와 보전에 관한 연구, 한국동굴학회, 제 36권, pp.72~89.
- 국립문화재연구소, 2010, 천연기념물 개방동굴의 특성연구 보고서, 국립문화재연구소 자연문화재연구실 천연기념물센터. 199p.
- 국립지질조사소, 1962, 고사리지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1962, 묵호지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1962, 영춘지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1962, 예미지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1962, 임계지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1962, 호명지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1963, 울진지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1966, 옥동지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1967, 단양지질도(1:50,000).
- 국립지질조사소, 1967, 삼척지질도(1:50,000).
- 국토해양부, 수자원공사, 1998~2012, 지하수 관측연보.
- 권동희, 2011, 지오사이트로서 석회동굴의 지형적 특성, 한국사진지리학회지, 제 21권, 제 1호, pp.45~55.
- 권동희, 유영준, 1996, 화암동굴의 환경보전에 관한 연구, 한국동굴학회지, 제 47권, pp.35~47.
- 기상청, 1998~2012, 기상연보.
- 김련, 2003, 영월 고씨굴의 지질학적 의미와 석순의 연령, 석사학위, 강원대학교, 강원도. 168p.

- 김련, 2011, 국내 개방동굴의 환경변화 분석과 관리방향, 박사학위, 강원대학교, 강원도. 172p.
- 김련, 우경식, 2007, 성류굴의 지질학적 연구, 대한지질학회, 추계학술발표회 초록집, pp.108.
- 김성길, 2003, 환선굴의 개발과 환경보전에 관한 연구, 배화논총, 제 22집, pp.19~36.
- 김원균, 원중선, 김상완, 1996, 원격탐사자료와 수치표고모형을 이용한 지질학적 선구조 분석기술: 경상분지 의성지역을 중심으로, 대한원격탐사학회지, 제 12권, 2호, pp.139~154.
- 김원진, 1998, 성류굴의 지형구조와 2차생성물 연구, 한국동굴학회지, 제 55권, pp.51~57.
- 김추운, 경만호, 변태근, 1992, 성류굴의 안전진단, 한국동굴학회지, 제 30권, pp.87~102.
- 네이버지도, 2013. 3., map.naver.com.
- 박수진, 손일, 2005, 한국 산맥론(I): DEM을 이용한 산맥의 확인과 현행 산맥도의 문제점 및 대안의 모색, 대한지리학회지, 제 40권, 제 1호, pp.126~152.
- 서무송, 1978, 백룡굴의 성인과 이차생성물에 관한 동굴지형학적 고찰, 한국동굴학회지, 제 3권, pp.1~6.
- 오종우, 1993, 지역개발에 수반되는 동굴지역의 지형조사(강원도 태백시 용연동굴), 한국동굴학회지, 제 36권, pp.32~42.
- 오종우, 1994, 고씨동굴의 내부지형에 관한 특성과 형성과정, 한국동굴학회지, 제 39권, pp.14~35.
- 우경식, 김련, 최용근, 2008, 노동동굴의 실태 및 보존가치에 대한 기초학술조사 보고서, 단양군.

- 우경식, 이무열, 2006, 강원도 동해시 천곡동굴의 지질학적 연구, 한국 제 4기학회 2006년도 추계학술대회, pp.31.
- 유영준, 이영화, 1996, 천곡동굴 개발에 따른 환경보전, 한국동굴학회지, 제 46권, pp.69~79.
- 이소영, 1998, 삼척 대이리 환선굴, 강원교육, pp.115~120.
- 이영혜, 1998, 고수동굴 지역의 지리환경, 한국동굴학회지, 제 54권, pp.21~28.
- 임병렬, 김정환, 이기무, 2003, 울진군 근남-원남면 일대의 지질구조: 소위 장군석회암에 대하여, 대한지질학회, 추계학술발표회 초록집, pp.11.
- 정소걸, 선우춘, 전양수, 정용복, 2005, 관광동굴의 안정성 평가와 지보 설계, 2005 한국암반공학회추계학술발표회, pp.87~99.
- 정창희, 김병우, 김추윤, 1994, 온달굴 지대의 자연지리 환경, 한국동굴학회지, 제 36권, pp.38~67.
- 정창희, 1991, 천곡동굴 부근의 지질개관, 한국동굴학회지, 제 27권, pp.53~67.
- 정창희, 1993, 고수동굴의 지질에 관한 연구, 한국동굴학회지, 제 32권, pp.63~76.
- 정창희, 1993, 환선굴지역의 지형 및 지질에 관한 연구, 한국동굴학회지, 제 34권, pp.11~22.
- 조경남, 우경식, 김정찬, 양동윤, Wang Y.J., Edwards R.L., Cheng Hai, 2008, 삼척시 대이리 관음굴 석순에 기록된 Dansgaard-Oeschger 기후변동, 지질학회지, 제 44권, 제 6호, pp.795~802.
- 천병식, 박형준, 2005, 유한요소해석에 의한 석회암 공동지반의 변형특성에 관한 연구, 한국지반환경공학회, 제 6권, 제 1호, pp.63~72.

- 최돈원, 우경식, 1996, 태백시 용연동굴의 성인 및 동굴생성물의 조직연구, 대한지질학회, 제 51차 정기총회 및 학술발표회, pp.56~57.
- 최영성, 2009, 동해시 천곡동 지역의 카르스트 지형 연구, 석사학위, 강원대학교, 강원도. 46p.
- 최진혁, 고경태, 김재윤, 김영석, 2012, 석회동굴 내 동굴생성물의 파괴특성을 이용한 고지진 연구: 경북 울진 성류굴의 예, 지질학회지, 제 48권, 제 3호, pp.225~240.
- 한공창, 천대성, 류동우, 박삼규, 2007, 무안 교촌리주거지역 지반침하 안정성분석, 터널과 지하공간, 제 17권, 제 1호, pp.66~74.
- 한국지질자원연구원, 2001, 한국지체구조도.
- 홍시환, 1983, 성류굴의 지형 분석, 한국동굴학회지, 제 9권, pp.6~14.
- 홍시환, 1986, 고씨동굴지역의 현황 조사, 한국동굴학회지, 제 13권, pp.23~48.
- 홍시환, 1995, 온달굴의 동굴생성물에 관한 연구, 한국동굴학회지, 제 40권, pp.11~38.
- 홍시환, 1996, 고수동굴의 용식지형지물 분석, 한국동굴학회지, 제 50권, pp.11~16.
- 홍충렬, 1995, 관광지로서의 천곡동굴 연구, 한국동굴학회지, 제 40권, pp.58~69.
- 홍충렬, 1995, 화암동굴지역의 지리환경연구, 한국동굴학회지, 제 41권, pp.41~50.
- 홍현철, 1991, 천곡동굴의 동굴퇴적물조사보고, 한국동굴학회지, 제 27권, pp.68~84.
- 홍현철, 2008, 개방동굴의 환경오염 메카니즘에 관한 연구 - 고수동굴을 사례로, 한국동굴학회지, 제 89권, pp.37~45.

- 홍현철, 변대준, 1993, 온달굴의 형태와 특성에 관한 연구, 한국동굴학회지, 제 34권, pp.23~29.
- 홍현철, 변대준, 1995, 화암동굴의 지형지물 특성에 관한 연구, 한국동굴학회지, 제 41권, pp.15~26.
- 홍현철, 변대준, 1995, 삼척 환선굴의 개발과 환경평가, 한국동굴학회지, 제 44권, pp.37~48.
- Alexander V.A., 1999, Casual hydrofracturing theory and its application for sinkhole development prediction in the area of Novovoronezh Nuclear Power House-2(NV NPH-2), Russia, *Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst*, Balkema, Rotterdam, pp.77~83.
- Attewell P.B., Farmer I.W., 1976, Principles of Engineering Geology. Chapman & Hall, London.
- Baecher G.B., Lanney N.A., 1978, Trace length biases in joint surveys, *19th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp.56~65.
- Barton N.A., Choubey V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, No.1, pp.1~54.
- Bieniawski Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering, Wiley, New York.
- Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses, *Civil Engineer in South Africa*, Vol.15, No.12, pp.335~344.
- Culshaw M.G., Waltham A.C., 1987, Natural and artificial cavities as

- ground engineering hazards, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol.20, pp.139~150.
- Dreybrodt W., Romanov D, Garbrovsek F, 2002., Karstification below dam sites: a model of increasing leakage from reservoirs, *Environmental Geology*, Vol.42, pp.518~524.
- Eeckhaut M.V.D., Poesen J., Dugar M., Martens V., Duchateau Ph., 2007, Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg(Belgium), *Geomorphology*, Vol.91, pp.19~37.
- Fookes P.G., Dennes B., 1969, Observation studies on fissure patterns in cretaceous sediments of south-east England, *Geotechnique*, Vol.19, pp.453~477.
- Fookes P.G., Hawkins A.B., 1988, Limestone weathering: its engineering significance and a proposed classification scheme, *Quarterly Journal of Engineering geology and Hydrogeology*, Vol.21, pp.7~31.
- Goodman R.E., 1993, Engineering Geology: Rock in Engineering Construction, Wiley.
- Hyatt J.A., Jacobs P.M., 1996. Distribution and morphology of sinkholes triggered by flooding following Tropical Storm Alberto at Albany, Georgia, USA., *Geomorphology*, Vol.17, pp.305~316.
- ISRM, 1978, International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in

- rock masses, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. And Geomecha. Abstr.*, Vol.15, pp.319~368.
- Jammal S.E., 1986, The Winter Park sinkhole and Central Florida sinkhole type subsidence, *International Association of Hydrological Sciences*, Vol.151, pp.585~594.
- Katz O., Rechesa Z., Roegiersc J.C., 2000, Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.37 pp. 723~728.
- Li Gongyu, Zhou Wanfang, 1999, Sinkholes in karst mining areas in China and some methods of prevention, *Engineering geology*, Vol.52, pp.45~50.
- Masuoka, P.M., Harris J., Lowman P.D., Blodget H.W., 1988, Digital Processing of Orbital Radar Data to Enhance Geological Structure: Examples from the Canadian Shield, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.54, pp.621~632.
- Newton J.G., 1987, Development of sinkholes resulting from man' activities in the eastern United States, *US Geological Survey Circular*, Vol.968, pp.1~4.
- Olivier Kaufmann, Yves Quinif, 2002, Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the 'Tournaisis' area, *Engineering geology*, Vol.65, pp.117~124.
- PALMER A.N., 1981, A Geological Guide to Mammoth Cave National Park, Zephyrus Press.

- Pinnaduwa H.S.W., Deepa N.W., Stephansson O., 1990, Three dimensional stochastic joint geometry modeling including a verification: A case study, *Rock Mechanics Contributions and Challenge*, Balkema, Rotterdam, pp.1051~1058.
- Priest S.D., Hudson J.A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, pp.183~197.
- Randall C.O., David J.W., Robert C.M. Richard W.H., Robert E.W., Stanka Sebela, 1999, A geologic framework in karst: US Geological Survey contributions to the hydrogeology of the Ozarks of Missouri, *Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst*, Balkema, Rotterdam, pp.57~62.
- Sabin, Floyd F., 1978, Remote sensing: principles and interpretation, W.H. Freeman and Company, New York.
- Waltham A.C., 1989, Ground subsidence, Chapman & Hall, London.
- Waltham A.C., Fookes P.G., 2012, Engineering classification of karst ground conditions, *Quarterly Journal of Engineering geology and Hydrogeology*, Vol.36, pp.101~118.

Abstract

Analysis for development orientation of limestone cave using weighting in South Korea

Sang Kyun Lee

Department of Civil, Urban and Geosystem Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Limestone areas of South and North Korea, mainly formed in Paleozoic Ordovician, are distributed in some areas. Limestone caves, developed in limestone areas, are the important geological research objects and have been used for purposes such as natural observation site and tourism.

This study is to more accurately understand the development orientations of limestone caves with based on discontinuities and orientations around limestone caves, and to analyze stability and ground state. 10 Limestone caves in South Korea is selected and analyzed.

To analyze the development orientation of each limestone cave, this study propose the new orientation analysis method using persistence

in addition to simple orientation analysis. The orientation analysis using weighting for persistence consists of two types. One is Average Span Ratio Method(ASRM) that analyzes the development of limestone cave with based on average span of total developed cave passage. The other is Individual Development Ratio Method(IDRM) using a ratio of persistence on span of each passage in limestone cave. According to interpreting between orientation analysis using only extracted number and orientation analysis using weighting for persistence, orientation analysis using weighting for persistence indicates a more accurate development orientation than using only orientation of limestone cave.

Throughout cross-comparison and analysis among development orientation of limestone cave and lineament analysis, discontinuities around each limestone cave, what structural geological factors have an main effect on the development orientation of each limestone cave is interpreted.

To interpret development aspects of limestone cave, it is analyzed for correlations between average span and persistence of passage and between average span and dip angle of bedding.

With based on various in-situ data acquisited around limestone cave, Rock Mass Rating(RMR) analysis is performed to understand the ground state using in-situ data, but partial and not represent the entire limestone cave.

These various interpretations should be a big help for understanding the ground when initial approaching engineering

geological project for limestone area.

In addition, through orientatin analysis using weighting for persistence in limestone cave, it should be helpful to estimate the orientation and the possibility of sustainable development.

Key words : limestone cave, development, orientation, lineament, fault, discontinuity, RMR(Rock Mass Rating)

Student number : 99411-808